



HAL
open science

Transcodage des nombres chez l'enfant : approche développementale, inter-linguistique et différentielle

Lana Saad

► **To cite this version:**

Lana Saad. Transcodage des nombres chez l'enfant : approche développementale, inter-linguistique et différentielle. Psychologie. Université de Bourgogne, 2010. Français. NNT : 2010DIJOL005 . tel-00567653

HAL Id: tel-00567653

<https://theses.hal.science/tel-00567653>

Submitted on 21 Feb 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE

UFR Science Humaines

Département de psychologie

Thèse

**pour obtenir le grade de
docteur de l'Université de Bourgogne
Discipline Psychologie**

Par

Lana SAAD

21-Mai-2010

Transcodage des nombres chez l'enfant

Approche développementale inter-linguistique et différentielle

Sous la direction du

Professeur Pierre BARROUILLET

&

Dr. Jean-François LECAS

Membres du Jury

Pr. BARROUILLET Pierre : FPSE, Université de Genève

Pr. FAYOL Michel : LAPSCO, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

Dr LECAS Jean-François : (MDC) LEAD-CNRS, Université de Bourgogne, Dijon

Pr. LEMAIRE Patrick : LPC-CNRS, Université de Provence

Pr. VINTER Annie : LEAD-CNRS, Université de Bourgogne, Dijon



*A mes chers parents Mansour & Badiaa
et à mon cher frère Louay*

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, professeur Pierre Barrouillet qui a continué à diriger mon travail malgré l'éloignement de Dijon qui alourdissait sa charge. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ces années, ainsi que pour ses orientations judicieuses, la clarté de ses propos et son souci permanent des aspects scientifiques. Je tiens à remercier également mon co-encadrant Docteur Jean-François Lecas pour sa confiance, sa disponibilité, sa patience, son soutien et notamment sa sympathie et ses encouragements, pour les échanges culturels et les discussions linguistiques, notamment ses explications sur la subtilité de la langue française et la diversité de ses expressions.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury qui me font l'honneur de participer à mon jury et qui ont accepté d'évaluer et de commenter ce travail.

J'adresse mes remerciements les plus chaleureux à ma très chère famille pour son soutien permanent -malgré la distance géographique qui nous sépare- fait d'une grande patience et de beaucoup d'amour pour supporter pendant toutes ces années mes changements d'humeur, pour m'avoir soutenue et encouragée dans ce travail de longue haleine.

Merci aussi à mon cher pays, en particulier à l'Université de Damas, pour m'avoir sélectionné et m'avoir donné l'opportunité de continuer mon parcours scientifique en m'attribuant une bourse pendant toutes ces années.

J'adresse un IMMENSE MERCI à ma deuxième famille en France « Gérard et Marie-Claude Guyon » pour leur attention, leur tendresse et leur soutien, en m'accueillant dans une ambiance familiale qui a atténué l'éloignement de ma famille et de mon pays. Je les remercie également pour tous les échanges joyeux et enrichissants, pour les belles sorties qui m'ont permis d'apprécier la beauté de la Bourgogne et de la Franche-Comté entre autres, pour la culture française qu'ils m'ont fait découvrir.

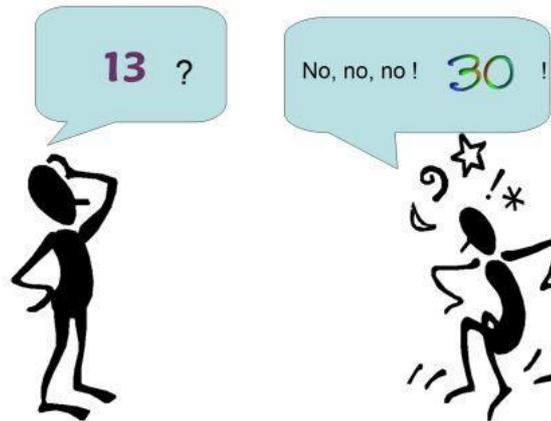
Un grand merci à tous mes amis, doctorants, et docteurs pour leur amitié, pour tous les moments privilégiés que j'ai pu passer avec chacun d'eux en dehors des murs du Laboratoire, pour toutes les expériences et les échanges culturelles, mention spéciale à Viviane et Arnaud pour leur attention, soutien et encouragement.

Reconnaissance aussi à l'AFFDU (Association Française des Femmes Diplômées des Universités) qui encourage, par son soutien financier, de jeunes doctorantes dans leurs recherches, mention spéciale à Mme Pouillard pour ses qualités humaines et son attention remarquable.

Je ne voudrais pas oublier les membres du laboratoire LEAD (laboratoire d'étude d'apprentissage et du développement) et plus particulièrement son directeur Emmanuel Bigand, pour son accueil chaleureux et les conditions de travail exceptionnelles que j'ai rencontrées.

Merci aussi aux étudiants de master et aux enfants qui ont participé à mes expériences, ainsi qu'aux enseignants de ces écoles pour leur collaboration et à Dr. Claudia Martin de l'université de Wuerzburg pour son aide précieuse à collecter des données chez les enfants Allemands.





« Les chiffres constituent l’alphabet de la langue des nombres, les unités avec lesquels on les écrit. Il faut remarquer que les quantités, les nombres, préexistaient aux chiffres. C’est parce que les nombres étaient là qu’il a fallu inventer les chiffres pour les représenter de façon ingénieuse ».

« Depuis la préhistoire, l’empire des nombres n’a cessé de s’étendre, jusqu’à ce qu’ils prennent aujourd’hui le pouvoir ». « Ce que j’aime, c’est le champ des nombres, les liens qu’ils entretiennent, les histoires extraordinaires qu’ils se racontent, leur sociabilité. Et aussi, le fait que des problèmes d’une extrême simplicité – dans leur formulation – résistent à toutes les tentatives de résolution depuis des siècles. Les nombres, vieux continent encore à explorer ».

Denis Guedj¹

¹ Mathématicien, professeur d’histoire des sciences et d’épistémologie, mais également de cinéma, à l’université de Paris VIII. « Science et avenir », N°160 octobre/novembre 2009.

Sommaire :

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Partie 1. La numération.....	6
-------------------------------------	----------

1.1. Approche historique.....	7
1.2. Approche théorique.....	14
- Le transcodage des nombres et ses théories psychologiques.....	14
- Modèles sémantiques	15
Le modèle de McCloskey et collaborateurs (1985)	15
Le modèle de Power & Dal Martello (1990).....	18
- Modèles asémantiques	20
Le modèle de Deloche et Seron (1987).....	20
Le Modèle ADAPT de Barrouillet et collaborateurs (2004).....	23
▪ Fonctionnement du modèle	24
▪ L'hypothèse principale d'ADAPT	33
▪ ADAPT et l'architecture cognitive générale.....	33
▪ ADAPT et le développement	34
▪ ADAPT et les spécificités linguistiques.....	35
▪ Les prédictions issues du modèle ADAPT.....	36

Partie 2. Le développement	41
---	-----------

2.1. L'apprentissage de la chaîne numérique verbale	42
Les irrégularités des systèmes numériques verbaux	43
2.2. Les études antérieures sur le transcodage	47
2.3. Etude exploratoire sur les enfants de CP.....	55
Introduction	55
Méthode.....	57
Résultats	58
Discussion	71
Conclusion.....	74

2.4. Etude de l'évolution des connaissances de transcodage	76
Introduction	76
- Présentation d'ADAPT _{BASIC}	77
- Types d'erreurs éventuels expliqués par le modèle	80
- Les structures numériques complexes	82
Méthode.....	84
Résultats	85
- Groupe de Grande Section (GS)	87
Les erreurs de transcodage sur les nombres	87
Erreurs de transcodage sur les structures lexicales des nombres	89
Ordre d'acquisition des règles	94
Evolution des différents types d'erreurs au cours des passations	96
- Groupe de Cours préparatoire (CP)	99
Les erreurs de transcodage sur les nombres	99
Erreurs de transcodage sur les structures lexicales des nombres	101
Ordre d'acquisition des règles.....	109
Evolution des différents types d'erreurs au cours des passations	111
Discussion	115
Conclusion	122
2.5. Conclusion générale de la partie développementale.....	123

Partie 3. Approche inter-linguistique	124
--	------------

Etude comparative de transcodage chez des enfants de Cours Préparatoire français, Allemands et Syriens	125
Introduction.....	125
- Le système numérique français.....	126
- Le système numérique allemand.....	126
- Le système numérique syrien.....	128
- Comparaison des systèmes linguistiques et apprentissage	133
- Modèles théoriques et diversité des systèmes numériques verbaux	135
- Le modèle ADAPT et les règles de transcodage	137
Méthode.....	139

Résultats	140
- Effet du sens de l'énonciation verbale du nombre et du sens d'écriture .	144
- Analyse qualitative des erreurs de transcodage	145
Système numérique verbal allemand.....	146
Système numérique verbal syrien	149
- Comparaison des types d'erreurs dans les systèmes : allemand, syrien et français	152
Discussion	153
Modèle ADAPT et diversité des systèmes numériques verbaux	154
Le système numérique allemand	156
Le système numérique Syrien	161
Conclusion.....	166

Partie 4. Approche différentielle	167
--	------------

Etude du transcodage des nombres et différences individuelles en mémoire de travail chez des enfants français de (CP) et de (CE1)	168
Introduction	168
La notion de mémoire de travail (MdT).....	168
Modèle de mémoire de travail.....	169
Méthode	174
Résultats.....	178
- Les règles du modèle ADAPT et les erreurs de transcodage.....	180
- La capacité de mémoire de travail	181
- Corrélations entre différents scores de mémoire sur les différents tests	183
- Effet de la capacité de la mémoire de travail sur le transcodage	185
- Effet de la MdT sur le transcodage des nombres selon les catégories lexicales	187
- Analyse qualitative et mémoire de travail	190
Erreurs commises en CP	190
Erreurs produites par les CE1.....	192
Discussion.....	193
Conclusion	197

Partie 5. Discussion générale	198
--	------------

- Quelles sont les connaissances de transcodage des enfants à l'âge de 6 ans (en moyenne) scolarisés en CP ?	200
- Les difficultés de transcodage en début d'apprentissage	201
Les règles de transcodage et la structure numérique verbale	201
L'impact de la structure verbale	202
- L'acquisition de transcodage.....	205
- Transcodage et différences linguistiques	207
- L'impact de la capacité de la mémoire de travail.....	210
- Le débat entre sémantique et asémantique	213
- Préconisations	215
- Perspectives de recherches futures	216

Références	220
-------------------------	------------

Annexes	233
----------------------	------------

Annexe 1.....	234
Annexe 2.....	236
Annexe 3.....	237
Annexe 4.....	238
Annexe 5.....	239
Annexe 6.....	240
Annexe 7.....	241
Annexe 8.....	242
Annexe 9.....	243
Annexe 10.....	245

1

INTRODUCTION

Toute civilisation a créé sa numération. Certaines étaient pauvres et limitées et donc abandonnées au cours du temps ou remplacées par d'autres systèmes plus performants. Des encoches préhistoriques aux chiffres indo-arabes, il a fallu plusieurs millénaires pour inventer une numération désormais universelle (la numération positionnelle indo-arabe). Un, deux, trois, ... dix doigts pour commencer à compter. Le début d'un long apprentissage qui a amené l'homme jusqu'aux concepts les plus élaborés. L'importance des nombres ne cessera de croître notamment dans les sociétés modernes et les technologiques actuelles.

Il faut distinguer entre numération verbale orale et numération écrite qui ne fonctionnent pas de la même façon. La première emploie des mots spécifiques (un lexique numérique) qui font partie de la langue parlée alors que la deuxième utilise des signes spécifiques (les chiffres de 1 à 9 et le zéro) qui ne font pas partie de langue parlée (elle est symbolique). Le système numérique arabe est toujours perçu comme simple : avec peu de chiffres et en utilisant la notation positionnelle, cette numération peut représenter tous les nombres ou quantités possible. Les deux systèmes de numération ne sont pas une simple traduction l'un de l'autre. La numération verbale orale s'acquiert assez tôt par les enfants dans leur contexte social et dépend des particularités de chaque langue parlée. Comme le souligne Perret (1985, p. 246) « *D'un point de vue mathématique, la numération parlée n'est qu'un accident de parcours requis par la communication orale. C'est une pratique commode, mais rien de plus. Du point de vue de l'élève, la maîtrise de la numération parlée relève d'un apprentissage comme un autre* ». Tandis que la numération arabe est utilisée d'une manière universelle et fait l'objet d'un enseignement systématique.

Plusieurs études ont étudié l'apprentissage et l'utilisation des systèmes numériques verbaux (Fuson, Richards & Briars, 1982 ; Siegler & Robinson, 1982). La plupart de ces systèmes ont un lexique limité désignant seulement peu de quantités et une syntaxe qui gère la notation des relations additives et multiplicatives permettant d'exprimer toute quantité. Toutefois, peu d'études ont été consacrées à étudier l'apprentissage du système numérique arabe. Pourtant l'utilisation de ce système soulève des difficultés chez les enfants malgré sa simplicité apparente. Comme l'a dit Fayol (1990, p. 50) « *Indubitablement, l'étude du code écrit – peut-être parce qu'il apparaît conceptuellement simple à l'adulte cultivé – n'a pas reçu la même attention que celle de la chaîne verbale. Toutefois, même en ce domaine, il a fallu attendre le début des années quatre-vingts pour que les systèmes de numération puissent être abordés sous un angle linguistique* »

En effet, pour maîtriser la numération, l'enfant doit découvrir les ressemblances, les différences et les permanences entre les deux systèmes numériques : verbal et arabe. L'apprentissage de la chaîne numérique verbale est l'une des conditions nécessaires à la construction des nombres écrits. Selon Fayol (1990, p. 39), « *la saisie des principes de construction linguistique de la chaîne à la fois allège la tâche et autorise l'étiquetage verbal de tout ensemble numérique* ». L'acquisition de la numération écrite permet au sujet d'accéder progressivement à la complexité du nombre et à ses propriétés. Cette acquisition exige de gérer le rapport permettant le passage entre le nom des nombres et leur correspondant graphique et vice-versa, ce qu'on appelle un transcodage. Tout transcodage demande une maîtrise minimale des codes source et de sortie.

Les mécanismes et les processus cognitifs impliqués dans le traitement des nombres ont fait l'objet d'un long débat entre modèles sémantiques et modèles asémantiques. Parmi ces modèles, un seul modèle permet de rendre compte du développement et de l'acquisition du système de transcodage. Le modèle nommé ADAPT (Barrouillet, Camos, Perruchet & Seron, 2004) est le premier modèle développemental de transcodage des nombres de leur forme verbale vers leur forme en chiffres arabes ; c'est également un modèle asémantique procédural. Ce modèle permet certaines prédictions concernant le développement du transcodage et son acquisition et fera l'objet d'une attention spécifique dans notre thèse.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer le transcodage des nombres de leur forme verbale dans leur forme en chiffres arabes chez les enfants en tout début de l'apprentissage scolaire. Elle tentera de répondre aux questions suivantes : quelles sont les difficultés auxquelles les enfants sont confrontés en transcodant les nombres (présentés oralement) en chiffres ? Quels sont les prédicteurs possibles de leurs erreurs ? Comment ce système se met en place et évolue avec l'apprentissage ? Comment le modèle ADAPT rend-il compte de ce développement ? Ce modèle est-il capable d'expliquer le transcodage dans différentes langues ? Quel est l'impact des spécificités linguistiques ainsi que celui de la capacité de mémoire de travail sur le transcodage ?

Cette thèse comprend quatre parties et une discussion générale. La thèse commence par une introduction historique et théorique, dans laquelle nous décrivons brièvement l'histoire de la numération et les différents systèmes qui pré-existaient avant d'aboutir aux systèmes numériques actuels. Nous exposerons ensuite les deux types principaux de modèles de transcodage : sémantique et asémantique en mentionnant l'apport et les limites de ces

modèles. Nous nous focaliserons sur le dernier modèle de transcodage numérique (ADAPT) et ses aspects développementaux. Enfin nous discuterons (ou synthétiserons) nos objectifs et nos hypothèses dans le cadre de ce modèle.

La deuxième partie est développementale. Elle comprendra quatre sous-parties et une conclusion. Dans la première, nous expliquerons l'acquisition du système numérique verbal. Nous exposerons ensuite, dans la deuxième, les études développementales du transcodage décrites dans la littérature. La troisième sera consacrée à l'étude exploratoire du transcodage chez un large échantillon d'enfants Français scolarisés en première année d'école primaire (Cours Préparatoire ou CP). Nous analyserons leurs erreurs (quantitativement et qualitativement) tout en cherchant les prédicteurs potentiels de ces erreurs. Dans la quatrième, nous nous intéresserons, dans une étude longitudinale, à l'acquisition du système de transcodage et sa mise en place dès l'année qui précède le cours préparatoire. Ainsi, nous testerons des enfants de deux niveaux scolaires ; en grande section maternelle (GS) et en CP, trois fois durant l'année scolaire. Nous nous appuierons sur la version « Basic » du modèle ADAPT concernant le transcodage des nombres jusqu'à 99 que nous discuterons. Nous finirons par une conclusion générale de cette partie développementale.

La troisième partie de la thèse, portera sur des aspects interculturels ou inter-linguistiques. Ainsi, nous comparerons le transcodage des nombres en début de l'apprentissage scolaire chez des enfants Allemands et Syriens. Nous confronterons également leurs résultats à ceux obtenus auprès des enfants Français (étudiés dans la 2^{ème} partie). Nous proposerons, à la lumière de ces résultats, les modifications nécessaires à apporter au modèle ADAPT_{BASIC} pour qu'il soit adapté au transcodage dans ces langues qui partagent certaines spécificités ou dans des langues similaires.

Dans la quatrième partie, nous évaluerons l'impact de la capacité de la mémoire de travail (MDT) sur le transcodage. Ainsi, deux expériences testeront le transcodage des nombres et la capacité de MDT chez des enfants des deux niveaux scolaires (CP) et (CE1). Nous réaliserons une comparaison entre la performance de transcodage chez les enfants qui présentent une faible capacité de MDT et ceux qui ont une capacité plus élevée.

Enfin, nous récapitulerons l'ensemble des résultats pertinents relevés durant ce travail de recherche dans une discussion générale. Nous proposerons des directions pour des recherches

futures, ainsi que des préconisations pédagogiques permettant d'aider les enfants dans leur apprentissage de la numération.

1

LA NUMERATION

1.1. Approche historique

Depuis la nuit des temps, l'Homme a eu besoin de compter et de calculer. A travers les civilisations, divers **systèmes de numération** ont été mis en place puis abandonnés. Au début, pour représenter les quantités, l'Homme a utilisé des matériaux (comme des cailloux, des entailles dans une écorce,...) ou son corps (par exemple les doigts de la main) ce qu'on a appelé « **systèmes de numération concrets** ». La première technique de ce système utilisait la correspondance terme à terme pour représenter le nombre d'éléments dans un ensemble. Cette technique permettait de vérifier que la numérosité d'un ensemble est restée inchangée au cours du temps. Par exemple, il était possible pour le berger de déposer dans un panier autant de cailloux que de moutons quittant la bergerie. En rentrant des prés, le berger sortait les cailloux du panier afin de vérifier le compte de moutons. La deuxième technique concrète (qui est toujours utilisée par les enfants aujourd'hui) correspondait à l'utilisation des doigts de la main. Dans certaines civilisations cette technique s'est étendue à d'autres parties du corps comme les orteils, les articulations des bras, des jambes, le cou... (Hurford, 1987). L'avantage de cette stratégie par rapport à la précédente était que le corps est toujours à portée de la main, ainsi il était suffisant de marquer telle ou telle partie du corps pour se rappeler le nombre en question où que l'on soit. Plus tard les cailloux ont été remplacés par des pierres de dimensions variées : un petit caillou présentait l'unité, un autre plus gros pour un groupement et encore plus gros pour un groupement de groupements. Ceci a été encore remplacé plus tard, en Mésopotamie, par l'utilisation d'objets (en terre cuite) de taille et de formes géométriques variées (petit cône = 1, petite bille = 10, grand cône 60,..). Cette étape reflétait donc le début d'apparition d'une « base ». Ensuite divers **systèmes numériques écrits** sont apparus. Ces systèmes ont évolué d'un stade « additif » à un stade « hybride » (relations additives et multiplicatives en même temps) pour aboutir au stade final de ce développement : le système positionnel.

La numération romaine par exemple, apparue vers 500 Av JC, utilisait la technique de numération **additive**. Chaque symbole a une valeur propre et il suffit d'ajouter les valeurs des symboles pour obtenir le nombre (e.g., en numération romaine, le nombre 15 s'écrit XV où X présente le nombre 10 et V le nombre 5). Cette technique demandait beaucoup de signes pour écrire un nombre. Cette numération, très utile à cette époque, présente de nos jours

l'inconvénient majeur de ne pas pouvoir autoriser toutes les opérations mathématiques. Vers 400 av JC, la numération grecque a constitué une nette avancée par rapport à la numération romaine. C'est un système intermédiaire entre un système additif et un système positionnel. Il utilisait la base dix et les lettres de l'alphabet grec ainsi que trois signes supplémentaires (I pour 1, Γ pour 5, Δ pour 10, H pour 100, X pour 1 000, M pour 10 000). Des relations multiplicatives ont été employées pour écrire certains nombres comme par exemple écrire Γ^{Δ} c'est-à-dire $(\Gamma \times \Delta) \rightarrow 5 \times 10 \rightarrow 50$ et Γ^H c'est-à-dire $(\Gamma \times H) \rightarrow 5 \times 100 \rightarrow 500$ (Ifrah, 1994). Ce principe multiplicatif existait aussi dans le système chinois traditionnel. Ce système fait appel à 13 symboles fondamentaux : les 9 unités et les 4 premières puissances de 10 (Figure 1.1.1)

一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	百	千	萬
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100	1 000	10 000

Figure 1.1.1 : La notation chinoise traditionnelle (Ifrah, 1981)

Ainsi le nombre 782 ($7 \times 100 + 8 \times 10 + 2$) s'écrit comme **七 百 八 十 二**

Ce système avait l'avantage d'être moins lourd à manipuler par rapport au système additif en gardant sa transparence. Toutefois, dans ces deux numérations (Romain & Chinois) le signe zéro n'était pas encore utilisé.

Le stade final de ce développement des systèmes de numérations était la **notation numérique positionnelle**. Ce système permet d'exprimer l'infinité des nombres avec seulement quelques signes graphiques dont la position au sein du nombre leur donne des valeurs différentes. La première numération de position est apparue vers le 2^{ème} millénaire avant JC chez les savants **babyloniens**. Dans leur système, on trouvait encore une trace d'ancienne logique (le principe additif). Les nombres jusqu'à 59 étaient représentés selon le principe additif, avec une base décimale. Par contre, à partir de 60, le système devenait positionnel et sexagésimal (c'est-à-dire de base 60^2). Deux symboles seulement étaient utilisés : le « clou vertical » \uparrow pour l'unité et le « chevron » \leftarrow pour la dizaine (Figure 1.1.2).

² Pourquoi la **base 60** ? Les sumériens comptaient sur leurs doigts. Le pouce d'une main compte les phalanges des quatre autres doigts de la même main, soit un maximum de **12 phalanges**. Une fois le maximum atteint, un doigt de l'autre main « retient » ce **12**. Avec les 5 doigts de l'autre main, on obtient alors un maximum de $5 \times 12 = 60$. D'où la base 60.



Figure 1.1.3 : Illustration des symboles utilisés dans la numération chinoise antique

La notation est ainsi strictement de position puisque la valeur du chiffre dépend de la colonne où il apparaît, le zéro est symbolisé par un espace d'autant plus grand que les zéros sont nombreux.

Un système de numération positionnelle à base « vingt »³ (système vigésimal) est apparu dans l'histoire aussi en Amérique centrale chez les Mayas (aux alentours du 3^{ème} siècle). Les 19 chiffres sont représentés par seulement 3 symboles (Figure 1.1.4):

	Symbole	Valeur
Point	•	1
Trait	—	5
coquille	⊖	0

Figure 1.1.4 : Symboles utilisés dans la numération des Mayas

Indépendamment des autres civilisations, les Mayas inventent le zéro qu'ils représentent par un coquillage. Les Mayas écrivent de haut en bas par puissances de 20 décroissantes. Le

nombre « vingt » s'écrit ainsi comme : $\begin{matrix} \text{coquille} & 1 \times 20^1 \\ & 0 \times 20^0 \end{matrix}$.

C'est vers la fin du VI^{ème} siècle en Inde, que les Indiens ont mis en place la numération que nous utilisons aujourd'hui avec tous ses chiffres. Les savants indiens ont eu l'idée ingénieuse de marier le principe de position - les neuf symboles - et le zéro en tant que nombre à part entière représentant une quantité qui n'existe pas. Dans « 806 », il n'y a pas de dizaine, le « 0 » marque cette absence. Moins d'un siècle après la mort du *Prophète Mahomet*, en 632, les Arabes s'étendent de l'Inde à l'Espagne en passant par l'Afrique du Nord. Au VIII^{ème} siècle,

³ De la base « vingt », il reste aujourd'hui dans le système français le mot « quatre-vingts » pour lire le nombre « 80 ».

Bagdad est un riche pôle scientifique. A cette époque, les Arabes ne disposent pas d'un système de numération performant. Ils emprunteront celui des Indes. Les chiffres indiens connaissent alors une double évolution graphique pour donner deux types de notation numérique: une transcription orientale (appelé « **hindi** ») pratiquée dès le XII^{ème} siècle et jusqu'à nos jours au Proche et Moyen Orient (Egypte, pays du golfe, Syrie, ...) et une transcription occidentale (« **ghubar** ») connue dans les pays du Maghreb et qui passant par l'Espagne arrivera jusqu'au monde occidental. C'est pour cette raison que l'on parle de chiffres arabes (Figure 1.1.5)

Orient	.	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
Occident	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Figure 1.1.5: les deux types des chiffres indiens utilisés actuellement

A l'heure actuelle, nous utilisons **le système de numération décimal positionnel**. Ce système est quasiment universel. La **numération décimale** regroupe les éléments à dénombrer par « **paquets de dix** ». On dit qu'on utilise la **base dix** ou **base décimale**. **En base dix** : les **nombre**s sont écrits à partir des **dix chiffres**⁴ : 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 et les **puissances de 10**. À la différence des systèmes numériques précédents ces symboles sont complètement détachés de l'intuition visuelle directe. La position d'un chiffre dans l'écriture d'un nombre exprime la puissance de 10 et le nombre de fois qu'elle intervient. L'absence d'une puissance est notée par un petit rond : c'est le zéro. Par exemple : 10 (dix) signifie 9 + 1 unité : une (1) dizaine et aucune unité (0). Ainsi, 123 signifie 3 unités, 2 dizaines et 1 centaine. Pourquoi dizaine ? Comme nous travaillons en base dix, nous ne disposons que de 10 chiffres avec lesquels nous ne pouvons exprimer avec un seul chiffre que les nombres compris entre 0 et 9. Le nombre entier succédant à 9 sera donc exprimé à l'aide de 2 chiffres: 10 où le chiffre 1 sera affecté d'un « poids » de dix. Pourquoi centaine ? Parce qu'avec 2 chiffres, on ne peut exprimer que les nombres entiers compris entre 0 et 99. Le nombre suivant 99 sera donc exprimé avec 3 chiffres: 100 où le 1 sera affecté d'un poids de cent. Dans la **numération de position**, la valeur des symboles change en fonction de leur place dans le nombre (ex: le chiffre 7 des nombres 71 et 17 n'a pas la même signification). Le zéro a un rôle fondamental et sa compréhension est nécessaire pour assimiler notre numération. Cette numération

⁴ Le mot français « chiffre » est une déformation du mot arabe « *sifr* » désignant zéro. En italien, zéro se dit *zero*, et serait une contraction de « *zefiro* » (source : dictionnaire étymologique Larousse) on voit là encore la racine arabe. Ainsi nos termes « chiffre » et « zéro » ont la même origine.

positionnelle permet d'écrire n'importe quel nombre avec un nombre limité de symboles ainsi qu'une simplification pour réaliser des calculs et des opérations arithmétiques. On peut également envisager d'autres bases de numération positionnelle (Tableau 1.1.1)

Tableau 1.1.1 : Quelques unes des principales bases de numération de position:

Base	Système	
2	Binaire	utilisé en informatique, les chiffres sont 0 et 1; dans un tel système notre 2 s'écrit 10, mais se lit « un-zéro » et non dix
8	Octal	utilisé en informatique : les chiffres sont 0,1, ...,7
10	Décimal	
12	Duodécimal	utilise les chiffres de 0 à 9 et les lettres A, B, qui est une base religieuse établie sur les douze signes du zodiaque. Cette base a été utilisée principalement dans le commerce (c'est à cause de l'utilisation de cette base que l'on parle encore d'une douzaine d'œufs ou d'une douzaine d'huîtres, les 12 mois de l'année, les 12 heures d'une montre, etc.)
16	Hexadécimal	utile en informatique : les chiffres sont 0, 1, ..., 9, et des lettres A, B, C, D, E, F
20	Vicésimal	utilisé par les Maya de 1600 avant J.-C. à 1500: ils comptaient avec les mains et les pieds : 10 doigts et 10 orteils. Cette base a été très utilisée, y compris en France, et il en subsiste quelques traces dans la numération actuelle (quatre-vingts, quatre-vingt-dix)
60	Sexagésimal	le système babylonien : vers 1800 av JC. Cette base est toujours utilisée de nos jours : les heures de la journée sont divisées chacune en 60 minutes, elles-mêmes divisées en 60 secondes. Il subsiste quelques traces de cette base dans notre numération actuelle (soixante, soixante-dix).

Le système numérique verbal :

En plus de la notation chiffrée, notre système de numération est transcrit verbalement. Ces deux systèmes ne sont pas une simple traduction l'un de l'autre malgré certains points en commun. Par exemple, le nombre 125 en chiffres ne correspond pas à *un deux cinq* à l'oral ni à *dix dix deux dix cinq*. Toutefois, le degré de transparence entre les deux systèmes varie d'une culture à l'autre (*cf. infra*). Ifrah (1981) distingue trois étapes qui marquent l'évolution des systèmes numériques oraux : 1) l'étape concrète où le nom d'un nombre correspond à un terme concret qui réfère directement à la quantité décrite (ex: soleil pour un, yeux pour deux,..). 2) dans la deuxième étape les mots nombres sont dérivés de la technique de représenter une quantité. Ainsi si les personnes comptent sur leurs doigts le « un » pourra se dire « auriculaire », le « deux » « majeur » et le « trois » « index »... 3) la dernière étape est abstraite où les noms des nombres se détachent de toute signification concrète (comme le cas

des mots *un, deux, trois*,... en français) . Des noms différents sont le plus souvent attribués aux dix premiers nombres (comme *un, deux, ..., dix* en français) ce qui sert de base à la construction des noms de nombres suivants. Cette construction n'a pas été produite en une fois dans l'histoire mais par des étapes successives (Hurford, 1987).

Les systèmes verbaux sont des systèmes conventionnels reposant sur deux grands principes : le premier est la lexicalisation qui associe à une cardinalité une seule dénomination ou un seul mot (*trois, seize*). Toutefois, puisque le nombre de quantités potentielles est infini, l'emploi de ce principe de lexicalisation se révèle limité. Il n'est utilisé que pour désigner un sous-ensemble restreint de quantité (les nombres de un à seize en français, les dizaines ainsi que cent, mille, million et milliard), d'où le besoin du deuxième principe : la combinaison des primitives. Cette combinaison des primitives permet de réaliser une infinité d'énonciations complexes correspondant à n'importe quelle cardinalité (*e.g.*, « trois cent soixante millions six cent dix mille cinq »). Ainsi, aucun mot unique n'existe pour exprimer par exemple la quantité 63, celle-ci nécessite l'association de deux mots : « soixante » et « trois ». Selon Hurford, ces combinaisons ne sont pas arbitraires mais elles suivent une règle permettant d'optimiser la différence arithmétique entre les deux termes utilisés. On aurait pu exprimer, par exemple « 63 » à partir des primitives « cinquante » et « treize » ce qui donne « cinquante-treize ». Cependant, cette expression n'est pas celle qui a été choisie au cours de l'histoire. Ceci résulte probablement du fait que lorsque les gens ont dû combiner des mots pour exprimer une quantité, ils ont choisi, parmi les formes numérales disponibles, celle qui faisait référence à la plus grande valeur, et ont construit la combinaison à partir de cette unité-là (Hurford, 1987). Le système numérique verbal que nous utilisons actuellement est un système « hybride », qui permet de combiner les mots dans des relations additives - « cent trois » = « cent + trois » - et des relations multiplicatives - « trois cents » = « trois x cent » - (voir Power & Longuet-Higgins, 1978 ; ou Hurford, 1987 pour plus de détails de ces règles syntaxiques). Evidemment de nombreuses expressions mathématiques contiennent les deux types de relation, somme et produit, comme dans « mille deux cent trente trois » ($1000 + (2 * 100) + 30 + 3$).

1.2. Approche théorique

Le transcodage des nombres et ses théories psychologiques :

Dans son milieu social, l'enfant rencontre et utilise relativement tôt les deux systèmes numériques : oral et écrit. Il convient de signaler que dans le contexte francophone, les deux systèmes ne sont ni équivalents ni réductibles l'un à l'autre. L'acquisition de la numération parlée est souvent considérée comme « spontanée » chez l'enfant, ne faisant l'objet d'aucun enseignement spécifique. En revanche, malgré la simplicité apparente de la numération écrite, son acquisition nécessite un enseignement systématique.

Ce passage de la forme verbale du nombre dans sa forme correspondante en chiffres appelé « transcodage » provoque des difficultés spécifiques. Cette activité de transcodage est rendue complexe par les différences entre les différents codes. Elle exige d'un côté la maîtrise des deux codes numériques d'entrée et de sortie, et d'un autre côté la maîtrise des règles de conversion entre leurs éléments. La saisie de la numération écrite nécessite de gérer le rapport permettant le passage entre le nom des nombres et leur correspondant graphique et vice-versa. Les mécanismes cognitifs sous-tendant le transcodage numérique ont fait l'objet de nombreuses études neuropsychologiques chez des patients cérébrolésés ainsi que des études auprès des enfants présentant des troubles d'apprentissage (Sokol, Macaruso & Golla, 1994; Sullivan, Macaruso & Sokol, 1996). Les études neuropsychologiques ont rapporté des déficiences spécifiques chez des patients lors du transcodage des nombres, principalement des adultes (pour quelques descriptions de cas : Cipolotti & Butterworth, 1995; Cipolotti, Butterworth & Warrington, 1994; Delazer & Denes, 1998; Lochy, Domahs, Bartha, & Delazer, 2004; McCloskey, Caramazza & Basili, 1985; Noel & Seron, 1995; Semenza, Borgo, & Guerrini, 1998; Singer & Low, 1933).

Différents modèles de transcodage ont émergé de ses études. On peut en distinguer deux types principaux : le premier regroupe les modèles *sémantiques*, comme celui de McCloskey (McCloskey, Caramazza, & Basili, 1985, et de Power et Dal Martello, 1990) qui supposent qu'on passe par une représentation sémantique abstraite (c'est-à-dire par le sens du nombre) dans toute activité de transcodage. Le deuxième type des modèles est *asémantique*, comme

ceux de Dehaene, (1992⁵) ; Deloche et Seron, (1987) ; Barrouillet, Camos, Seron et Perruchet, (2004) qui supposent que nous n'utilisons pas obligatoirement le sens du nombre pour l'écrire mais que nous utilisons des procédures pour passer d'un code à l'autre.

Modèles sémantiques :

- **Le modèle de McCloskey et collaborateurs (1985):**

Ce modèle a été élaboré par un groupe de neuropsychologues cognitivistes sous la direction de McCloskey et formulé sur la base de nombreuses études de cas. Il a été publié la première fois en 1985 (McCloskey, Caramazza & Basili, 1985) et amélioré progressivement dans des travaux ultérieurs (Sokol, McCloskey, Cohen et Aliminosa, 1991 ; McCloskey, Aliminosa et Sokol, 1991 ; McCloskey, 1992 ; Macaruso, McCloskey et Aliminosa, 1993). L'architecture de ce modèle s'inspire largement des modèles psycholinguistiques et des modèles développés à cette époque en neuropsychologie pour les activités de lecture et d'écriture (Morton, 1970 ; Allport & Funnell, 1981). Ce modèle constitue "une mise en forme de propositions théoriques largement inspirées de ce qui est connu par ailleurs du traitement des mots ou du lexique numérique. Power et Longuet-Higgins (1978), par exemple, avaient déjà distingué le composant lexical, le composant syntaxique et le composant sémantique dans le domaine des nombres" (Noël, 1994, p.37). Son architecture est fortement modulaire, caractérisée par une représentation sémantique centrale qui joue un rôle pivot, cette architecture intégrant les activités de transcodage et le calcul simple. Une première distinction de base s'établit entre le système de calcul et le système de traitement des nombres. Ce dernier contient des sous-systèmes de compréhension et de production et postule une représentation sémantique intermédiaire entre ceux-ci (Figure 1.2.1).

⁵ Plusieurs études neuropsychologiques (Cipolotti, 1995; Cipolotti, Warrington et Butterworth, 1995; Cohen, Dehaene et Verstichel, 1994) sont en faveur d'un transcodage asémantique.

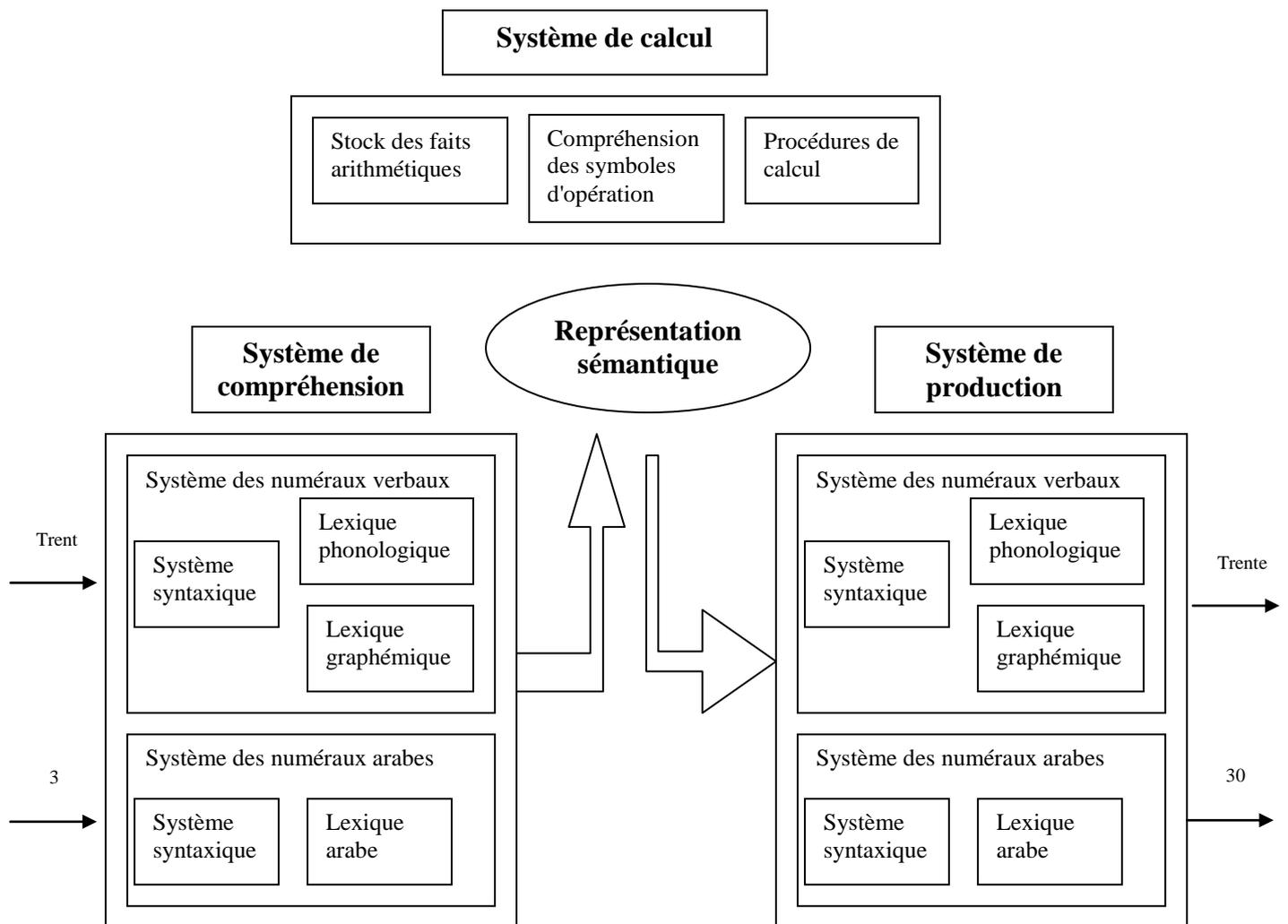


Figure 1.2.1 : Le modèle du calcul et de traitement des nombres de McCloskey, Caramazza et Basili (1985)

Chacun de ces sous-systèmes contient des composants de traitement spécifiques à chaque code : le code verbal (le nombre écrit en mots ou prononcé à voix haute) et le code arabe (le nombre écrit en chiffres). A l'intérieur de ceux-ci existent des mécanismes lexicaux et d'autres syntaxiques. Les premiers traitent les éléments isolés composant le nombre (mot ou chiffre); les deuxièmes permettent de traiter les relations combinant ces éléments pour construire un nombre spécifique comme un tout. Les mécanismes de compréhension sont responsables de convertir un nombre donné, en analysant les relations syntaxiques entre les primitives lexicales, dans une représentation sémantique. Les mécanismes de production traduisent cette représentation interne abstraite dans une notation de sortie appropriée (verbal oral ou écrit, ou arabe). Selon McCloskey *et al.*, la représentation sémantique élaborée est codée sous un format interne abstrait et amodal indépendamment des codes de présentation et/ou de

production. Le système numérique utilisé dans la majorité des cultures contemporaines étant en base dix, cette représentation spécifie les quantités de base d'un nombre et la puissance de dix qui y sont associées. Par exemple, la représentation sémantique abstraite de « 430 » serait la suivante : {4} 10 EXP 2 ; {3} 10 EXP 1 dont les chiffres entre accolades {} correspondent aux représentations sémantiques des quantités de base du nombre et « 10 EXP n » signifie la puissance de dix associée à chaque quantité. Cette représentation sémantique est la même pour le nombre écrit « quatre cent trente » ou pour la séquence phonologique correspondante. Ainsi, la nature abstraite de cette représentation sémantique renvoie à son format indépendamment des caractéristiques de surface dans lesquelles est exprimé le contenu (par exemple le numéral « 25 » présenté en chiffres arabes ou à l'oral « vingt-cinq » activerait la représentation sémantique abstraite et unique {2} 10 EXP1, {5} 10 EXP0). La représentation de la quantité {0} n'est pas incluse dans la représentation sémantique abstraite puisque le zéro en tant que tel représente une quantité nulle et il n'est utilisé que dans le code arabe. La représentation sémantique n'étant pas basée sur un système positionnel (puisque chaque quantité est directement liée à la puissance de dix correspondante), il n'y a aucune raison d'inclure une représentation pour cette quantité nulle (McCloskey, Sokol & Gooman, 1986). Les auteurs supposent que l'exposition à un système numérique différent (pas en base dix) amènerait probablement à une représentation interne appropriée à ce système. D'après le modèle, les troubles pourraient affecter sélectivement un module (compréhension, production ou calcul), une notation numérique (verbale ou arabe) ou les mécanismes syntaxiques ou lexicaux. Ces postulats étaient soutenus par les données neuropsychologiques auprès des patients atteints de lésions cérébrales. Par exemple, plusieurs patients⁶ ont montré une dissociation entre des processus de compréhension intacts et des processus de production altérés, d'autres ont montré un déficit sélectif dans la compréhension des numéraux verbaux alors que la compréhension des numéraux arabes était intacte et *vice versa* (compréhension intacte des numéraux verbaux et compréhension déficitaire des numéraux arabes ; McCloskey *et al.*, 1985).

Le modèle de MacCloskey a constitué pendant longtemps un cadre théorique très utile pour examiner et interpréter la performance de patients présentant des troubles du traitement des nombres. Toutefois, il a été critiqué dernièrement sur la base des résultats empiriques en

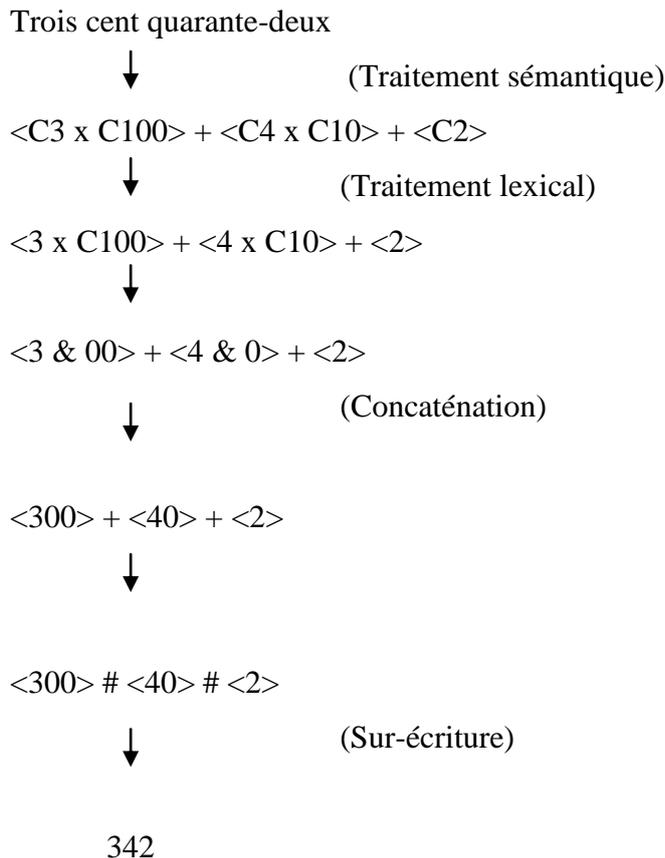
⁶ Pour quelques descriptions de cas : Benson et Denckla (1969) ; le cas de JO rapporté par Gardner, Strub et Albert, (1975) ; Singer et Low, (1933) ; les patients HY et JG rapporté par McCloskey, Sokol et Goodman, (1986) ; le patient RH rapporté par Macaruso, McCloskey et Aliminosa, (1993) ; le cas de Paul rapporté par Temple, (1989) ; le patient JS rapporté par Sokol et McCloskey (1988) ; le cas de CG rapporté par Cipolotti, Butterworth et Denes (1991).

neuropsychologie qui ont souligné la limite de l'hypothèse de modularité de la représentation sémantique et son activation obligatoire en transcodage et en calcul simple (Seron et Noël, 1995, Noël et Seron, 1995). McCloskey lui-même (1992, p.121) a reconnu que l'hypothèse d'un transcodage asémantique mériterait plus d'attention. Par ailleurs, selon Noël (1994, p.36) « l'hypothèse de modularité semble parfois un peu trop simplificatrice ; elle manque de précisions dans les mécanismes de compréhension impliqués dans la transformation d'une entrée numérique en sa représentation sémantique. Par exemple, l'existence d'un module de compréhension des nombres verbaux n'était pas clairement établie dans le sens où une dissociation nette entre le traitement des nombres verbaux isolés, c'est à dire les primitives lexicales comme « cinq », et le traitement des autres mots comme « juin », n'a pas été décrite ». Le modèle était focalisé principalement sur la spécification des processus impliqués dans les tâches numériques et aucune proposition d'interaction des capacités numériques avec d'autres domaines cognitifs comme l'attention, la langue, la mémoire, etc, n'a été faite.

- **Modèle de Power & Dal Martello (1990):**

L'hypothèse d'une représentation sémantique indépendante de toute notation a été remise en question à plusieurs reprises par des données liées à l'influence de la structure lexico-syntaxique du numéral en entrée sur les étapes de traitement ultérieures (Noël et Seron, 1995; Power et Dal Martello, 1990). Power et Dal Martello (1990) ont élaboré un modèle de transcodage des numéraux verbaux en numéraux arabes, à partir des observations auprès des enfants soumis à une tâche de dictée des nombres (*cf. Infra*). Ce modèle distingue, comme le modèle de McCloskey *et al.* (1985), l'étape de compréhension du nombre verbal qui conduit à la construction de la représentation sémantique appropriée et l'étape de production du nombre en chiffres arabes à partir de cette représentation. Toutefois, à la différence de McCloskey, cette représentation sémantique n'est pas en base dix mais elle est liée à la structure verbale des numéraux et la reflète parfaitement. Ainsi, ce modèle considère les quantités de base qui sont les primitives lexicales de 1 à 9 ainsi que les quantités 10, 100 et 1000 qui sont les primitives sémantiques (ces primitives seraient transformées directement dans une représentation sémantique *e.g.*, « cinq » → C 5, « cent » → C 100). Tout autre numéral représente la somme ou le produit de plusieurs primitives. Ainsi, la représentation sémantique comprend les relations additives (comme dans 45 correspondant à 40 + 5) et multiplicatives (300 correspondant à 3 x 100) du numéral. Par exemple, la représentation sémantique du nombre « 345 » est donc (C100 x C3) + [(C10 x C4) + C5] où le préfixe « C » indique la représentation sémantique d'une quantité donnée. Cette représentation sémantique serait

convertie en un numéral arabe par l'étape de production. Le système de production applique des règles de sur-écriture et de concaténation. Ainsi, une opération de sur-écriture (écrire sur le zéro de droite) sera déclenchée dans le cas d'une relation de somme et une opération de concaténation sera activée lorsque la représentation contient une relation de produit (Figure 1.2.2).



Concaténation (&) : écrire à droite du premier chiffre

Sur-écriture (#) : écrire sur les zéros en commençant par la droite

Figure 1.2.2: l'écriture des nombres (arabes) sous dictée : algorithme proposé par Power & Dal Martello (1990)

Dans le cadre de ce modèle, les erreurs observées de transcodage d'un nombre verbal en chiffres arabes de type, *cent vingt* transcodé *10020*, sont interprétées comme un échec dans l'application de la règle de sur-écriture, alors que les erreurs de type, *deux cent* transcodé *2100*, sont interprétées comme un échec dans application de la règle de concaténation. Les

auteurs ont observé que les enfants commettent plus d'erreurs sur les relations de somme que de produit et ont donc plus de difficultés à acquérir la règle de sur-écriture que la règle de concaténation. Plusieurs erreurs pourraient résulter d'une application erronée de la règle de concaténation au lieu de la règle de sur-écriture dans les relations d'addition (*e.g.*, pour le nombre « cent deux » → transcodé <C100> + <C2> → appliquer la règle de concaténation 100 & 2 et donc finir par écrire 1002 au lieu d'appliquer la règle de sur-écriture 100 # 2 qui conduit à écrire 102). Le modèle de Power et Dal Martello a fourni une interprétation de la plupart des erreurs produites par les enfants en transcodant de la forme verbale en écriture arabe. Toutefois, des études ultérieures auprès d'enfants ont montré la limite de ce modèle à expliquer toutes les erreurs, surtout celles produites par exemple par les enfants français en transcodant les nombres complexes à partir de 70 (Seron et Fayol, 1994) ainsi que l'hypothèse d'une représentation sémantique (Barrouillet *et al.* 2004). (*cf infra*)

Modèles asémantiques :

- **Le modèle de Deloche et Seron (1987) :**

Deloche et Seron (1982 a et b) ont étudié les erreurs produites par des patients aphasiques lorsqu'ils devaient transformer un nombre écrit en nombre arabe (cent trente – 130) et vice versa (130 – cent trente). Ces travaux ont montré la diversité des erreurs produites et étaient à l'origine du premier modèle cognitif de transcodage des nombres (Cipolotti & Thioux, 2004). Dans le cadre d'un transcodage numérique du code verbal oral vers le code digital, Deloche et Seron (1982a, 1982b, 1987) ont distingué deux étapes principales :

La première, *lexicale*, consiste en une analyse des éléments lexicaux en parcourant la chaîne numérique verbale de gauche à droite (ou du début jusqu'à la fin dans le cas du code phonologique) et en la segmentant pour isoler les primitives lexicales et activer les représentations correspondantes dans le lexique⁷. Après ce processus de segmentation, un processus de catégorisation des primitives identifiées se met en place. Chaque primitive lexicale est caractérisée par la classe lexicale à laquelle elle appartient (unité, particuliers, dizaines), mais aussi par la position qu'elle occupe à l'intérieur d'une classe donnée. Par exemple, les nombres « quatre », « quatorze », « quarante » occupent la même position

⁷ Deloche et Seron postulent que le lexique des nombres est organisé suivant une structure de classes où chaque élément est identifié par deux types d'information : la classe lexicale à laquelle il appartient et la position qu'il occupe dans cette classe. Ainsi en français (pour les nombres verbaux) on distingue trois classes : les unités (de un à neuf), les particuliers (de *onze* à *seize*) et les dizaines (de *dix* à *nonante*). En plus de ces trois classes, il y a les « séparateurs » (*cent, mille, million, ...*) et le zéro.

(quatrième) mais dans des classes différentes, alors que (deux, trois, quatre) appartiennent à la même classe lexicale mais en y occupant chacun une position différente. Ce processus identifie aussi les séparateurs « cent », « mille » et « million » qui déclenchent l'algorithme de transcodage. Une atteinte à ce niveau entraînerait des erreurs lexicales dues à un transcodage erroné d'une primitive lexicale. Ce mauvais encodage conduit à la production d'un numéral de classe différente mais partageant la même position dans la classe (ex: *treize* transcodé 30). Alors que d'autres erreurs résulteraient d'un mauvais encodage de la position dans la classe. (ex: *huit* transcodé 7, ou *cent vingt* transcodé 130). D'autres erreurs qui résultent de l'inversion de deux mots (quatre cent transcodé 104) ou d'un encodage partiel (trois cent transcodé 3) ont également été attribuées à l'étape lexicale du transcodage.

La deuxième étape est le transcodage en lui-même. Il correspond à l'application des règles de réécriture permettant la production d'un cadre syntaxique (consistant en trois cases vides) et le « remplissage » de ce cadre (les chiffres corrects dans la position correcte) sur la base des informations de classe et de position dans la classe issues de l'étape précédente. Enfin, le processus d'encodage se met en place pour permettre l'écriture du nombre en chiffres. Une erreur à ce niveau engendre des erreurs dites syntaxiques correspondant à une variation de la longueur des nombres écrits en chiffres. L'erreur dite de « lexicalisation », correspond à un transcodage mot à mot du nombre verbal sans intégration des éléments dans une structure syntaxique (par exemple, « quarante-cinq » devient « 405 »). Cette erreur de lexicalisation peut être aussi partielle et ne toucher qu'une partie du nombre (deux cent quarante cinq transcodé 20045, toujours selon Deloche et Seron 1987). L'exemple suivant illustre les étapes du transcodage d'un nombre donné en code verbal écrit à son code en chiffres arabe (Figure 1.2.3)

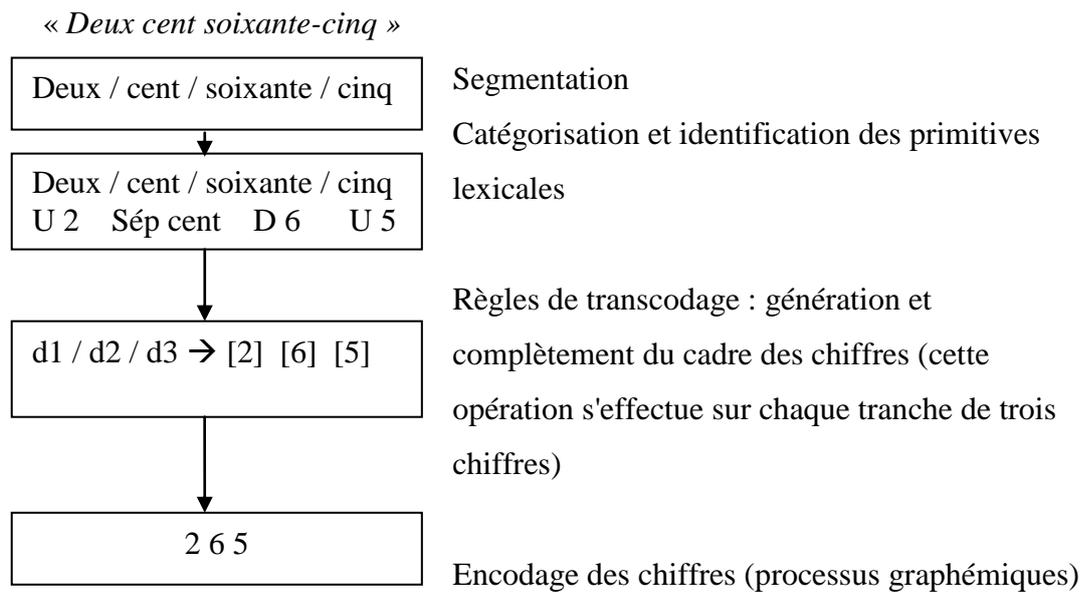


Figure 1.2.3 : Les étapes principales du transcodage du code verbal écrit en code arabe selon le modèle de Deloche et Seron (1987)

Ce modèle est donc asémantique puisque la transformation du code source dans le code cible pour un nombre donné se ferait en appliquant des règles d'écriture qui opèrent directement sur les primitives du code source, sans élaboration nécessaire de la représentation de la quantité. Il a fourni une description fonctionnelle des processus de transcodage qui s'effectuent en appliquant un nombre limité de règles. Les auteurs ont montré aussi que leur modèle rend compte des erreurs de transcodage observées chez les enfants et les patients avec des troubles mentaux. Ces travaux ont permis de mettre en évidence les particularités psycholinguistiques du système numérique. Ils ont permis la distinction entre erreurs lexicales et erreurs syntaxiques ainsi que les notions de classe lexicale et position dans la classe. Cependant, l'hypothèse d'un transcodage asémantique a été critiquée par certains, notamment par l'équipe de McCloskey, Caramazza & Basili, 1985), ainsi que le fait de privilégier l'étude de groupes plutôt que l'étude de cas individuels pour déterminer l'origine des erreurs. Par exemple, l'erreur de position dans la classe (*e.g.*, sept transcodé huit ou cent vingt transcodé 130) supposée provenir d'un mauvais encodage de l'information de position lors du traitement de la forme verbale présentée. Toutefois, cette erreur pourrait également être provoquée par une mauvaise sélection des chiffres arabes dans le lexique lors de la production. Par ailleurs, malgré ces avantages, ce modèle reste limité et inapproprié du point de vue du développement

et de l'apprentissage (Barrouillet *et al* 2004). D'une part, l'application de la plupart des règles suppose la création d'un cadre à trois cases quel que soit le nombre à transcoder. C'est-à-dire que même le transcodage d'un petit nombre à un ou deux chiffres exige la même connaissance que la transcription d'un nombre plus grand ou plus complexe. D'autre part, comme il suppose un lexique limité aux primitives lexicales qui peut être stocké en mémoire à long terme (MLT), ce modèle laisse peu de place à l'apprentissage des connaissances déclaratives. L'utilisation fréquente des règles de transcodage pour les nombres à deux chiffres, et l'encodage direct de la correspondance entre la forme verbale et la forme en chiffres avec le temps, devrait créer une association entre les deux formes en MLT (Barrouillet *et al*, 2004 p.370).

- **Le Modèle ADAPT de Barrouillet et collaborateurs :**

ADAPT a été développé récemment par Barrouillet et ses collaborateurs pour transcoder les nombres de leur forme verbale (phonologique ou alphabétique) en leur forme en chiffres. Les auteurs de ce modèle se sont particulièrement intéressés au transcodage chez les enfants. Comme l'indique le nom du modèle ADAPT (**A** Developmental, **A**semantic, and **P**rocedural **T**ranscoding model) ce modèle présente trois propriétés principales: il est développemental, asémantique, et procédural.

Comme d'autres modèles antérieurs (Deloche et Seron, 1987; Power et Dal Martello, 1997), ADAPT est un modèle **asémantique**⁸. Il suppose que le transcodage d'un nombre (présenté verbalement) en sa forme en chiffres et l'utilisation de la notation positionnelle ne nécessitent pas de représenter la quantité correspondante au numéral verbal. Autrement dit, lorsque nous transcrivons « trois cent vingt cinq » en « 325 », il n'est pas nécessaire que nous traduisions qu'il s'agit de 3 centaines, 2 dizaines et 5 unités. Par ailleurs, ADAPT est le premier modèle **développemental** de transcodage des nombres. Il explique l'acquisition et la formation de nouvelles règles de transcodage à partir des règles déjà apprises et le stockage de nouvelles connaissances en mémoire à la suite de chaque transcodage. Ces connaissances dirigent à leur tour les transcodages ultérieurs. Ainsi ADAPT est un système qui s'auto-modifie dans son fonctionnement par un processus élémentaire d'apprentissage associatif et il a trois versions selon l'état de son développement : la version ADAPT_{BASIC} pour les premières étapes de

⁸ « La nature asémantique du modèle ne veut pas dire que les auteurs pensent qu'il est impossible qu'une représentation sémantique soit élaborée en parallèle à partir de la forme d'entrée. Ils supposent tout simplement que dans les activités de transcodage, la forme de sortie n'est pas construite à la base de cette représentation sémantique (voir Noël et Seron, 1997, pour une proposition similaire) » Barrouillet *et al*, 2004, p.370.

l'apprentissage et le transcodage des petits nombres (de « un » à « quatre-vingt-dix neuf »), ADAPT_{ADV} correspond à l'état du système lorsque les formes les plus simples ont été mémorisées (à partir de 99) et encore ADAPT_{LD} qui représente un état intermédiaire (lorsque certaines formes simples comme les dizaines-unités « DU » ne sont pas encore stockées en mémoire). Enfin, ADAPT est un modèle **procédural**. En effet, un système de production constitue le cœur de ce modèle, ce système gère la transformation de la forme verbale en sa forme correspondante en chiffres arabes en appliquant un ensemble de procédures (ou des règles). Ces procédures sont gérées par une architecture standard de type ACT-R (Anderson, 1993). Ces points vont être développés par la suite (*cf. infra*).

Fonctionnement du modèle :

Lorsqu'on entend une séquence verbale correspondant à un nombre, le modèle suppose que cette séquence serait encodée et stockée sous une forme phonologique dans une mémoire tampon ou « buffer » dans le modèle. La difficulté de ce stockage temporaire dépend du nombre de syllabes et de leur degré de similarité phonologique (Baddeley, 1986 ; Eriksen, Pollack & Montague, 1970 ; Klapp, 1971). En outre, vue la fréquence relative des items dans le lexique numérique (Dehaene & Mehler, 1992) certains items ont un coût de stockage plus élevé que d'autres. Ce processus d'encodage phonologique est suivi par un processus de « parsing » qui découpe cette chaîne, du début du signal auditif à la fin, dans des unités qui peuvent être traitées séquentiellement par le système de production.

Avant tout apprentissage systématique, le découpage de la chaîne numérique verbale correspondant à un nombre résulte en l'identification de primitives lexicales (qui peuvent être différentes d'une langue à l'autre). En français ces primitives sont les mots unités (de « un » à « neuf »), les particuliers (de « onze » à seize »), les dizaines (de « dix » à « soixante ») et les séparateurs (« cent », « mille » et million) alors qu'en anglais les primitives lexicales sont les unités (de « one » à « nine »), les mots « eleven » et « twelve », les teens (de « thirteen » à « nineteen »), les dizaines (de « ten » à « ninety ») et les séparateurs. Au début de l'apprentissage les primitives lexicales résultant du « parsing » contiennent un seul mot. ADAPT_{BASIC}, qui transcode les nombres jusqu'à 99 (*une explication détaillée de cette version fera l'objet de notre attention dans la Partie 2.4*), associe chaque primitive lexicale à sa catégorie sémantique c'est-à-dire à sa classe lexicale. Comme Deloche et Seron (1987) l'ont postulé, les connaissances en mémoire à long-terme associent la primitive avec sa position dans la classe lexicale (*e.g.*, « quatre » et « quarante » sont associées à la quatrième position respectivement dans les classes des unités et de dizaine). Après avoir récupéré cette valeur

positionnelle en mémoire à long terme, elle sera placée par les procédures dans la chaîne de chiffres en construction en mémoire de travail (MDT ou WM en anglais).

Ces **procédures** qui constituent le cœur du système de production, ont la forme « condition – action ». Elles ont comme rôle général de construire la chaîne numérique qui devra être produite en fin de traitement. Elles doivent lire le contenu de la mémoire de travail, y placer de nouvelles représentations ou compléter les représentations existantes. Lorsque les conditions d'application d'une règle correspondent au contenu actuel de la mémoire de travail, cette règle sera déclenchée. La partie condition a un rôle fixe. Elle vérifie l'état de connaissances qui peuvent se trouver en mémoire de travail et qui peuvent être de trois types: (1) la nature de l'entrée qui peut être une unité représentationnelle, ou un séparateur, ou la fin de la chaîne verbale, (2) la présence de connaissances récupérées en mémoire à long-terme et devant être placées dans la chaîne de chiffres en construction (dans ADAPT_{ADV} ceci est indiqué par : WM = yes ou WM = no, WM : mémoire de travail), (3) la présence de cases vides dans cette chaîne créées par l'application des procédures précédentes (Frame = yes ou Frame = no dans le modèle). La partie action des procédures à deux rôles. Le premier est de déclencher la récupération des formes arabes en mémoire à long-terme et de les placer dans la mémoire à travail en attendant qu'elles soient utilisées par d'autres règles. Le deuxième rôle est la concaténation de ces formes dans une chaîne de chiffres en construction en gérant le placement de cases vides. En fin de traitement, la chaîne en chiffres arabes construite par les procédures est stockée temporairement dans un buffer et sera transformée en production écrite par des procédures graphomotrices (Figure 1.2.4).

Comme nous avons pu le remarquer, le système de production ne fonctionne pas indépendamment des autres structures constituant le système cognitif. Il est, par contre, en constante interaction avec la mémoire de travail qui joue l'intermédiaire entre les informations venant de l'extérieur (la chaîne verbale) et les informations venant de la mémoire à long-terme (les connaissances déclaratives acquises antérieurement par l'individu).

En accord avec Anderson (1993), **La mémoire de travail** contient donc, au cours du traitement, des représentations déclaratives qui prennent la forme:

- de représentations d'éléments de la situation externe (*i.e.*, les unités verbales isolées par le parsing).
- de connaissances récupérées en mémoire à long-terme (*i.e.*, les formes en chiffres correspondant aux formes verbales).

- de représentations construites par le système de production par l'application de procédures (la chaîne en chiffres arabes en construction). Elles peuvent prendre la forme de suites de chiffres pouvant contenir des cases vides. Par exemple, un état de cette représentation peut avoir la forme « 25_ _ » ou « 1_ 36 ». Ces trois types de représentations constituent d'ailleurs les trois classes de conditions qui peuvent déclencher les procédures.

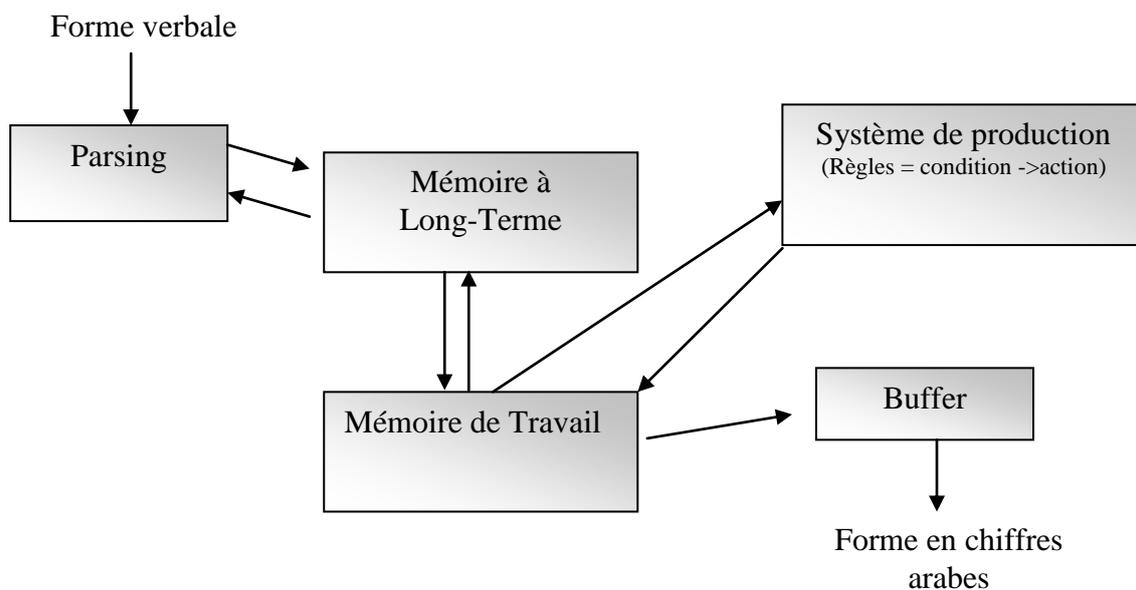


Figure 1.2.4: ADAPT est un modèle de transcoding des nombres de leur forme verbale en leur forme en chiffres arabes qui implique différentes structures du système cognitif.

Fonctionnement du parsing :

Le parsing est dirigé par les unités représentationnelles stockées en mémoire à long-terme et résulte en découpage de la chaîne numérique verbale en portions qui sont susceptibles d'être traitées par le système de production. Ces portions résultant du parsing, qui peuvent contenir plusieurs mots, correspondent nécessairement soit à des éléments dont la forme en chiffres est disponible en mémoire et peut en être récupérée directement, soit en séparateurs (cent et mille) qui déclenchent les règles de production. Lorsque la chaîne verbale à traiter ne correspond pas à une unité représentationnelle stockée en mémoire, le parsing recherche les séparateurs déclencheurs de règles. Il fonctionne de façon hiérarchique en découpant successivement la chaîne de chaque côté de ces séparateurs en commençant par « mille » lorsque la chaîne verbale contient ce séparateur et ensuite par le séparateur « cent ». Ce processus est répétitif pour chaque sous-chaîne obtenue et s'arrête à chaque fois que la forme en chiffres correspondant à une sous-chaîne est accessible en MLT. Par exemple, lorsque le

parsing opère sur la chaîne verbale « trois cent mille deux cent quarante quatre » si la forme correspondant en chiffres n'est pas disponible en MLT et ne peut pas donc être récupérées, le parsing découpe la chaîne verbale de chaque côté du séparateur « mille » (*i.e.*, « trois cent » et « deux cent quarante quatre »). Ensuite le « parser » vérifie successivement si les formes en chiffres de « trois cent » et « deux cent quarante quatre » sont disponibles en MLT. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si ces formes en chiffres ne sont pas disponibles en MLT, le « parser » découpe ces sous-chaînes de chaque côté du séparateur « cent » et teste la présence des formes en chiffres correspondant à ces sous-chaînes en MLT. Si ces formes sont disponibles en MLT (*i.e.*, « trois cent », « deux » et « quarante-quatre »), le processus de « parsing » identifie les unités suivantes : « trois cent », « mille », « deux », « cent » et « quarante-quatre ». Sinon, lorsque une sous-chaîne ne contient pas un séparateur et n'est pas non plus disponible dans le lexique, elle est découpée jusqu'à ce que les primitives lexicales soient identifiées (*e.g.*, « quarante-quatre » coupé en « quarante » et « quatre »). En résumé, le transcodage algorithmique proposé par ADAPT est effectué lorsqu'une récupération directe en MLT échoue.

ADAPT_{ADV} ; le transcodage des nombres jusqu'à 999999

Le fonctionnement du système procédural d'ADAPT_{BASIC}, qui transcode les nombres (de 1 à 99, *cf.* deuxième partie), conduit à la mémorisation des formes en chiffres produites et donc à leur récupération directe en mémoire. Par conséquent, les règles de transcodage d'ADAPT_{BASIC} seraient progressivement abandonnées et remplacées par une seule règle de récupération des formes en chiffres les plus simples (P1) dans un état plus avancé du modèle appelé ADAPT_{ADV} (Tableau 1.2.1).

ADAPT^{ADV}: Procedural Transcoding for Numbers up to 999999

Procedure	Condition	Action
P1	Input = lexic	Find val in LTM Set val in WMS Read next input ^a
P2a	Input = <i>cent</i> [hundred] WMS = no Frame = no	Set 1 in chain ^b Set frame ___ in chain ^c Read next input ^a
P2b	Input = <i>cent</i> WMS = yes Frame = no	Set WMS in chain ^b Clear WMS ^d Set frame ___ in chain ^c Read next input ^a
P2c	Input = <i>cent</i> WMS = no Frame = yes	Set 1 left to frame ___ Read next input ^a
P2d	Input = <i>cent</i> WMS = yes Frame = yes	Set WMS left to frame ___ Clear WMS ^d Read next input ^a
P3a	Input = <i>mille</i> [thousand] WMS = no Frame = no	Set 1 in chain ^b Set frame ____ in chain ^c Read next input ^a
P3b	Input = <i>mille</i> WMS = yes Frame = no	Set WMS in chain ^b Clear WMS ^d Set frame ____ in chain ^c Read next input ^a
P3c	Input = <i>mille</i> WMS = no Frame = yes	Fill empty slots with 0s Set frame ____ in chain ^c Read next input ^a
P3d	Input = <i>mille</i> WMS = yes Frame = yes	Set WMS right in frame Clear WMS ^d Fill empty slots with 0s Set frame ____ in chain ^c Read next input ^a
P4a	Input = end WMS = yes Frame = no	Set WMS in chain ^b Stop
P4b	Input = end WMS = no Frame = yes	Fill empty slots with 0s Stop
P4c	Input = end WMS = yes Frame = yes	Set WMS right in frame Clear WMS ^d Read next input ^a

Tableau 1.2.1 : La version ADAPT_{ADV} (Barrouillet *et al.*, 2004, p.373)

Note. The input condition tests the nature of the unit selected by the parser. Unless otherwise noted, the “Set” action sets digits to the right of those already in the chain of digits. The procedures P2a, P2c, P3a, and P3c, which are necessary because of the one deletion rule in French, can be removed to process numbers in English. lexic = representational unit stored in the lexicon; val = associated digital form of the representation unit stored in the lexicon; LTM = long-term memory; WMS = working memory store, which either contains a digital form (i.e., “yes”) or is empty (i.e., “no”); chain (e.g., in “Set 1 in chain”) = chain of digits being constructed in working memory; Frame = absence (i.e., “no”) or presence (i.e., “yes”) of empty slots in the chain of digits being constructed in working memory; end = end-of-string signal sent by the parser to ADAPT. ^a This action enters the following unit selected by the parser in working memory. ^b These actions set a 1 or the digital form stored in WMS in the chain of digits being constructed. ^c These actions set a frame of two or three empty slots to the right of the chain of digits. ^d This action empties the WMS.

Exemple :

- « trois cent trente quatre »
- Entrée = unité → (P1) : récupérer « 3 » en MLT
- Entrée = cent → (P2b) : placer MDT en chaîne (3)
cases vide = non → placer deux cases vides → 3 _ _
Lire l'entrée suivante
- Entrée « trente-quatre » → (P1) : récupérer « 34 » en MLT et le placer en MDT
- Entrée = fin, MDT = oui, cases vides = oui → (P4c) : placer MDT à droite dans les cases vides, vider MDT

Cette version du modèle rend possible le transcodage des nombres jusqu'à 999999 (pour des exemples, *cf.* Barrouillet *et al.*, 2004, p. 374) en supposant que les formes en chiffres des nombres jusqu'à 99 sont récupérées directement en MLT. Ceci fait que les procédures d'ADAPT_{ADV}, et à la différence de l'ADAPT_{BASIC}⁹, sont déclenchées par trois types de conditions : (1) la nature de l'élément verbal en entrée (« input » dans le modèle), (2) la présence des cases vides dans la séquence de chiffres en mémoire de travail placées par des procédures précédentes, (3) la présence (ou non) des formes en chiffres récupérées en mémoire à long-terme et devant être placées dans la chaîne de chiffres en construction. La partie « action » des procédures d'ADAPT_{ADV} a deux rôles : le premier concerne la récupération des formes en chiffres correspondant aux unités isolées par le « parser » si ces formes sont disponibles en MLT. A la différence d'ADAPT_{BASIC}, ces formes en chiffres ne correspondent pas seulement aux primitives lexicales dans leurs classes respectives mais aussi à une séquence de chiffres (appelée « val » dans le modèle) associée à une unité représentationnelle (portion de la chaîne verbale qui peut contenir plusieurs primitives lexicales, appelé « lexic » dans le modèle, pour laquelle la forme en chiffres est disponible en MLT). Ces formes vont être placées en mémoire de travail (MDT) et peuvent être utilisées ensuite par d'autres procédures. Le deuxième rôle concerne la concaténation de ces formes en chiffres de gauche à droite et la planification des cases vides à remplir, soit par les formes récupérées ultérieurement, si elles existent, soit par un ou des zéros. Lorsqu'une unité représentationnelle est identifiée par le « parser », la procédure P1 dans ADAPT_{ADV} sera déclenchée. Cette règle récupère la forme en chiffres correspondant en MLT et la place dans

⁹ Les procédures d'ADAPT_{BASIC} (*cf.* partie 2.4) sont déclenchées par deux types de conditions : la nature de l'entrée lexicale (primitive lexicale) et la présence d'une case vide dans la séquence de chiffres en MDT.

la mémoire tampon (WMS : working memory store, dans le modèle), en attendant qu'elle soit placée ultérieurement dans la chaîne, et fait entrer l'unité suivante en MDT. Le modèle permet donc un transcodage direct de certaines parties de la chaîne numérique verbale. Par exemple, à un niveau de développement donnée, le transcodage du nombre « deux cents cinquante mille deux cent huit » pourrait commencer par une récupération de la forme en chiffres de « deux cent cinquante » (250) si cette partie correspond à une unité représentationnelle déjà construite, tandis que, la partie « deux cent huit » pourrait demander d'autres étapes de « parsing ». Dans ce cas là, la procédure P1 place la forme (250) dans le WMS, ensuite « mille » sera entré en MDT ce qui déclenche la règle P3b qui produit la chaîne (250_ _ _). Ainsi, le nombre et la nature de règles nécessaires pour le transcodage d'un nombre varie en fonction des connaissances stockées en MLT.

Le traitement des séparateurs :

Les séparateurs sont traités par des règles spéciales formant le cœur du système procédural et non pas par la règle P1. Lorsque le processus de « parsing » rencontre un séparateur, il est directement envoyé au système de production sans tester la présence d'une unité représentationnelle correspondante dans le lexique. Il faut noter que la forme des mots « cent » et « mille » peut dans certains cas être récupérée directement en mémoire. Ceci s'explique par le fait que le processus de « parsing » cherche d'abord la chaîne entière ou des parties de cette chaîne (sous-chaîne) en MLT, avant d'effectuer une décomposition. Ainsi, la forme en chiffres (100) peut être directement récupérée si le processus de « parsing » identifie le mot « cent » comme une unité représentationnelle en MLT, sinon une décomposition de la chaîne sera effectuée et « cent » sera identifié comme séparateur qui déclenche la règle P2a (qui produit la séquence 1 _ _) suivie par la règle P4b (responsable de remplir les cases vides par 0 ce qui donne « 100 »). Comme l'illustre le Tableau 1.2.1 ADAPT_{ADV} ci-dessus, les séparateurs « cent » et « mille » sont transcodés par les procédures (de P2a à P2d et de P3a à P3d respectivement) dépendant du contenu de la mémoire tampon (la présence d'une forme en chiffres à insérer en chaîne) et de la présence des cases vides à remplir dans cette chaîne en chiffres en construction. Ces procédures ont deux rôles principaux : premièrement, lorsqu'il existe une forme en chiffres stockée en mémoire tampon (WMS dans le modèle), elles placent cette forme dans la chaîne et programment à droite de cette chaîne deux cases (dans le cas de « cent ») ou trois cases (dans le cas de « mille »). Deuxièmement, lorsque la mémoire tampon est vide et qu'il n'y a aucune case programmée à remplir (c'est-à-dire lorsque ces séparateurs sont les premiers dans la chaîne numérique verbale), le chiffre « 1 » est placé dans la chaîne

de chiffres par les procédures P2a et P3a. Contrairement à l'hypothèse de Deloche et Seron (1987) qui supposent la programmation de trois cases quelle que soit la taille du nombre à transcoder, les procédures d'ADAPT expliquées ci-dessus montrent que ceci n'est pas nécessaire. L'application de certaines procédures, comme P2a, P2b, P3a et P3b (qui gèrent le transcodage de « cent » et « mille » respectivement lorsqu'il n'y a pas de case vide à remplir), permettrait une transcription directe du chiffre « 1 » ou du contenu de la mémoire tampon (WMS) pendant que les cases qu'ils génèrent sont retenues en mémoire. Ceci permet d'éviter la surcharge de la mémoire de travail mais peut en même temps provoquer certaines erreurs (*cf.* le cas de LR analysé par Barrouillet *et al.*, 2004, p.389). Par exemple, dans le transcodage du nombre « vingt cinq mille deux cent treize », la règle P3b, déclenchée en identifiant le séparateur « mille » et la présence de « 25 » dans la mémoire tampon, permettrait de transcrire « 25 » directement et de programmer trois cases vides qui sont retenues en mémoire de travail (MDT).

Les procédures (P4a, P4b et P4c) sont déclenchées par la fin de la chaîne numérique verbale. Elles ont comme rôle de placer le contenu de la mémoire tampon (s'il existe) dans la chaîne de chiffres en construction et de remplir les cases vides par 0s.

ADAPT_{LD}

La version ADAPT_{ADV} suppose que toutes les formes dizaine-unité (DU) ont été déjà stockées en MLT et sont donc transcrites par une récupération directe en mémoire. En effet, vu que l'enseignement systématique du transcodage des nombres en France commence durant la dernière année de l'école maternelle, les auteurs du modèle ADAPT supposent qu'en deuxième année de l'école primaire (CE1) les enfants devraient avoir stocké en MLT les formes DU. Toutefois, ils pensent que les difficultés posées par les nombres dizaines et dizaines-unités complexes en français (de « soixante-dix » à « quatre-vingt dix-neuf ») nécessitent toujours des règles additionnelles (P1d et P1f *cf. infra* Tableau 1.2.2, ADAPT_{LD}). Ainsi au lieu de la règle P1 d'ADAPT_{ADV}, ADAPT_{LD} utilise les règles (P1a, P1b, P1c, P1d et P1f), le reste des règles restant inchangé.

*ADAPT^{LD}: Procedural Transcoding for Numbers up to 9999
When the Decade–Unit Forms Are Not Available in Long-Term
Memory (LTM)*

Procedure	Condition	Action
P1a	Input = unit WMS = no	Find val in LTM Set val in WMS Read next input
P1b	Input = unit WMS = yes	Find val in LTM Replace 0 in WMS by val Read next input
P1c	Input = dec WMS = no	Find val in LTM Set val in WMS Read next input
P1d	Input = dec WMS = yes	Find val in LTM Add val to number in WMS Read next input
P1e	Input = teen WMS = no	Find val in LTM Set val in WMS Read next input
P1f	Input = teen WMS = yes	Find val in LTM Add val to number in WMS Read next input
P2a	Input = <i>cent</i> [hundred] WMS = no Frame = no	Set 1 in chain Set frame __ in chain Read next input
P2b	Input = <i>cent</i> WMS = yes Frame = no	Set WMS in chain Clear WMS Set frame __ in chain Read next input
P2c	Input = <i>cent</i> WMS = no Frame = yes	Set 1 left to frame __ Read next input
P2d	Input = <i>cent</i> WMS = yes Frame = yes	Set WMS left to frame __ Clear WMS Read next input
P3a	Input = <i>mille</i> [thousand] WMS = no	Set 1 in chain Set frame ___ in chain Read next input
P3b	Input = <i>mille</i> WMS = yes	Set WMS in chain Clear WMS Set frame ___ in chain Read next input
P4a	Input = end WMS = yes Frame = no	Set WMS in chain Stop
P4b	Input = end WMS = no Frame = yes	Fill empty slots with 0s Stop
P4c	Input = end WMS = yes Frame = yes	Set WMS right in frame Clear WMS Read next input

Tableau 1.2.2 : La version ADAPT_{LD} (Barrouillet *et al.*, 2004, p.378)

Note. Unit = units; teen = teens; dec = decades; val = associated digital form of the representation unit stored in the lexicon; WMS = working memory store, which either contains a digital form (i.e., “yes”) or is empty (i.e., “no”); chain (e.g., “Set 1 in chain”) = chain of digits being constructed in working memory; Frame = absence (i.e., “no”) or presence (i.e., “yes”) of empty slots in the chain of digits being constructed in working memory; end = end-of-string signal sent by the parser to ADAPT.

L'hypothèse principale d'ADAPT

Lorsqu'une chaîne verbale correspond à une unité représentationnelle stockée en mémoire à long-terme, cette chaîne est transcodée par une récupération directe en mémoire de sa forme en chiffres. Un transcodage algorithmique (en utilisant des procédures) est utilisé lors de l'échec de la récupération directe en mémoire. En outre, la récupération est un processus probabiliste qui dépend de la force de la représentation en mémoire à long terme (Anderson, 1993). Cette récupération peut donc échouer, soit parce que la forme en chiffres n'est pas stockée en mémoire à long terme (si elle n'a jamais été perçue auparavant), soit parce que l'association entre la forme verbale et la forme en chiffres n'est pas suffisamment forte. Ainsi, la chaîne verbale serait découpée en unités susceptibles d'être traitées par le système de production.

ADAPT et l'architecture cognitive générale:

Le modèle est basé sur une architecture classique, dans laquelle le système de production utilise les connaissances stockées en mémoire (Anderson, 1983, 1990, 1993; Anderson & Lebière, 1998). Il suppose aussi que la chaîne verbale est maintenue active pendant le traitement dans une mémoire phonologique tampon (phonological buffer). Ce dernier peut correspondre dans le modèle de Baddeley (1990) à la boucle articulatoire.

Comme c'est le cas pour le modèle « PARSER » (Perruchet & Vinter, 1998), le processus de parsing est conforme à des lois élémentaires de la mémoire et de l'apprentissage associatif.

En accord avec plusieurs modèles, la mémoire de travail (MDT), dans laquelle la chaîne en chiffres est construite, est considérée comme l'ensemble des connaissances activées en MLT (Anderson, Reder, & Lebière, 1996; Cowan, 1995, 1999; Engle, Kane, & Tuholski, 1999; Lovett, Reder, & Lebière, 1999).

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, le modèle ADAPT suppose que les trois types de connaissances qui peuvent être retenues en MDT déterminent les trois types de conditions déclenchant les règles. La formation des associations en MLT entre les formes verbales et les formes en chiffres correspondantes, est un processus élémentaire d'apprentissage et d'automatisation (Logan, 1988). Avec la pratique, le renforcement de ces traces mémorielles (Anderson, 1993; Siegler, 1996) ou la multiplication des traces identiques (Logan, 1988) pourrait augmenter la probabilité d'une récupération directe. Ainsi, ADAPT suppose que la transcription des nombres verbaux en chiffres n'exige qu'un processus cognitif général qui se distingue des autres activités cognitives seulement par la nature spécifique des procédures déclenchés et les connaissances mobilisées pour ce but.

ADAPT et le développement :

ADAPT est un modèle développemental de transcodage des nombres qui permet d'en rendre compte par deux processus importants : la création de procédures et l'accroissement du lexique en mémoire à long-terme (MLT).

Concernant **la création de procédure**, ADAPT suppose, en accord avec le modèle ACT-R d'Anderson (1993), que toute connaissance démarre sous forme déclarative. Ainsi les règles de transcodage sont dérivées d'une connaissance déclarative sur laquelle s'applique un processus d'analogie. En compilant ces processus d'analogie, les règles (ou les procédures) émergent en créant des variables qui pourraient remplacer les valeurs spécifiques. Par exemple, lorsqu'on sait que « trois » se transcrit en « 3 » et que « vingt-trois » se transcrit en « 23 », alors on peut découvrir que « vingt-cinq » se transcrit en « 25 » en remplaçant le « 3 » de « 23 » par le « 5 ». Dans cet exemple, une compilation d'analogie amène à la création de la règle Pa' en ADAPT_{BASIC}.

En accord avec Anderson (1993), le processus de compilation se réalise au cours de l'apprentissage par la découverte mais surtout par l'enseignement systématique qui constitue le meilleur environnement où les processus d'analogie peuvent être planifiés pour faciliter l'apprentissage. Par ailleurs, les procédures les plus avancées peuvent être construites en modifiant et intégrant des procédures qui existent¹⁰ déjà car les procédures d'ADAPT ont la même structure dans leur partie condition. Par exemple, la règle de transcodage des nombres centaines comme « trois cent deux » est une modification de la règle responsable du transcodage des dizaines-unités (DU) à la différence que ce sont deux, et non pas une, cases vides à programmer. De même, les procédures P3a et P3b de l'ADAPT_{ADV} responsables du transcodage de « mille » sont une simple réécriture des règles P2a et P2b à la différence qu'elles programment trois cases vides au lieu de deux. Ainsi il y a une sorte de généralisation puisque cette nouvelle règle produit les mêmes résultats que l'ancienne mais sur des nombres plus grands. En plus, certaines règles peuvent être créées en fusionnant les conditions d'application de règles déjà existantes, ce qui fait que la partie action correspond aussi la réunion des actions des règles fusionnées.

¹⁰ "L'émergence des nouvelles règles n'a pas été implémentée sur ordinateur ni testée empiriquement." (Barrouillet *et al.*, 2004, p.376). Dans ce travail de recherche - c'est un des objets de cette thèse - nous allons tester de manière empirique la version ADAPT_{BASIC}.

Concernant **l'évolution du lexique**, ADAPT suppose qu'avec le fonctionnement du système procédural, le lexique d'ADAPT (c'est-à-dire les unités représentationnelles stockées en MLT) évolue¹¹. Les petits nombres (comme les DU par exemple) forment progressivement des unités représentationnelles qui sont identifiées par le « parsing » telles qu'elles et donnent lieu à une récupération directe en MLT. Ainsi, le système de transcodage peut se développer non seulement par l'addition des nouvelles règles mais aussi par le remplacement des parties entières du système de production (règles concernant le transcodage des nombres jusqu'à 99) par un processus de récupération directe en mémoire. Ceci est vrai aussi pour le transcodage des nombres spéciaux comme l'année courante ou le code postal. Ces nombres, vu leur fréquence d'occurrence, forment aussi des unités représentationnelles (bloc) et donnent lieu à une récupération directe en mémoire de leur forme en chiffres.

ADAPT et les spécificités linguistiques :

ADAPT est un modèle général de transcodage des nombres. Les auteurs ont présenté son application pour la langue française. Cependant il peut être adapté sans difficulté à la langue anglaise en supprimant quelques règles concernant le transcodage des dizaines complexes en français et les règles concernant le transcodage de « cent » et « mille » (P2a, P2c, P3a et P3c) qui sont spécifiques aussi à la langue française puisqu'en anglais on dit « one hundred » ou « one thousand » alors qu'en français on énonce directement « cent » et « mille » (Barrouillet *et al.*, 2004, p. 371)

Le modèle est considéré « relativement indépendant des spécificités linguistiques en accord avec les doutes récents concernant la validité du relativisme linguistique dans le domaine numérique »¹² (Brysbaert, Fias, & Noël, 1998; Saxton & Towse, 1998). Ainsi, avec quelques modifications, ADAPT peut rendre compte du transcodage dans les langues dites transparentes comme la langue japonaise qui reflète parfaitement le système en base dix. Pour le transcodage des nombres jusqu'à 99, dans la langue japonaise par exemple, les règles Pa et Pa' du modèle ADAPT_{BASIC} exigées pour traiter les unités ainsi que les règles d'arrêt Pe et Pe' restent inchangées. Une seule règle est à ajouter aux précédentes pour gérer l'équivalent de

¹¹ Le fonctionnement du modèle ADAPT a été simulé informatiquement, ce qui a permis d'évaluer l'évolution du lexique et particulièrement l'accroissement de sa taille en fonction de la nature des formes qui sont à transcoder. Les auteurs ont constaté que certaines formes, comme les DU (*e.g.*, « dix-sept ») ou les unités-cent (UC : *e.g.*, « deux-cent ») donnent lieu à un apprentissage rapide et que leur transcription ne nécessitait plus un transcodage algorithmique étant assurée par une récupération directe des formes correspondant en chiffres en mémoire (Barrouillet *et al.*, 2004, p.381)

¹² Barrouillet *et al.*, 2004, p.377

« dix » et qui a une seule action « placer une case vide en chaîne ». Ainsi, pour cette langue le modèle est très simple, vu qu'un accès à une seule classe lexicale (la classe de l'unité) est demandé. Cette simplicité explique pourquoi la performance des enfants asiatiques est meilleure que celle des enfants européens au début de l'apprentissage (Miura, Okamoto, Kim, Steere, & Fayol, 1993 ; Miura, Okamoto, Kim, Chang, Steere & Fayol, 1994).

Cependant, malgré cette indépendance, ce modèle peut rendre compte de la différence de traitement liée uniquement à la forme linguistique. Par exemple, Noël and Seron (1997) ont montré que le nombre « 1200 » énoncé « mille deux cents » ou « douze cents » est traité différemment par les sujets. Alors que les modèles sémantiques prédisent que la représentation sémantique doit être la même pour les deux formes, le modèle ADAPT (version ADAPT_{ADV}) rend compte de cette différence observée par le type et le nombre de règles à utiliser. Pour transcoder le nombre « mille deux cents », quatre règles sont nécessaires (P3a, P1, P2d, et P4b), alors que pour transcoder « douze cents » il faut seulement trois règles (P1, P2b, et P4b).

Les prédictions issues du modèle ADAPT :

Concernant le développement, à la différence des autres modèles de transcodage, le modèle ADAPT est évolutif. Le processus d'apprentissage dans le modèle ADAPT reflète un système qui utilise un lexique grandissant dépassant la limite des primitives lexicales. Ainsi, le modèle suppose que même les jeunes enfants doivent utiliser la récupération directe des formes en chiffres lorsqu'ils transcodent certains nombres ou des parties des nombres auxquels ils sont souvent confrontés. Ce processus de récupération directe, permis par l'accroissement du lexique, augmente l'efficacité de transcodage puisqu'il évite la mise en œuvre d'un algorithme de transcodage impliquant de nombreuses procédures. En conséquence, les erreurs seront moins nombreuses car l'application de chaque procédure peut probablement conduire à une erreur. Ces prédictions ont été testées lors d'une étude développementale (Barrouillet *et al.*, 2004, *cf. infra*). Ainsi le principe sous-jacent du modèle est la transition d'un transcodage algorithmique à une récupération directe en MLT des formes en chiffres des nombres les plus fréquents apparaissant seuls ou comme partie de nombres plus complexes.

Concernant la nature asémantique, ADAPT est un système de production qui postule que le transcodage d'un nombre ne dépend pas du sens mathématique de la forme verbale du nombre mais de la nature lexicale de la forme verbale en entrée et de l'état courant du processus de transcodage (la présence d'une case vide à remplir par exemple). Par conséquent, un

traitement erroné d'une entrée lexicale donnée devrait amener à produire différents types d'erreurs en fonction de sa position dans la chaîne verbale.

Concernant la nature procédurale du système, trois prédictions peuvent être proposées par le modèle. Premièrement, ADAPT prédit, comme tous les modèles procéduraux, que la difficulté du transcodage d'un nombre donné devrait dépendre du nombre de procédures exigées pour son transcodage. Deuxièmement, ADAPT distingue entre transcodage algorithmique en appliquant plusieurs règles et le transcodage par récupération directe en mémoire. Par conséquent, des erreurs lexicales et syntaxiques résulteraient d'un dysfonctionnement des différentes parties du système de transcodage. C'est-à-dire, un échec dans le transcodage algorithmique conduirait à produire des erreurs syntaxiques alors que des difficultés en récupération directe amèneraient à produire des erreurs lexicales. Enfin, concernant les patients cérébrolésés, la dégradation du système de transcodage correspondrait à un dysfonctionnement d'un sous-ensemble de règles qui peut être identifié.

Par ailleurs, comme ce système de production est implémenté dans l'architecture cognitive, son fonctionnement sera soumis à des contraintes générales liées à cette architecture. L'efficacité du processus de transcodage devrait dépendre du coût cognitif du fonctionnement de ce système, c'est-à-dire, de celui entraîné par la mise en œuvre des règles de transcodage exigées. Ainsi, les difficultés de transcodage chez les jeunes enfants au début d'apprentissage ou chez les adolescents souffrant de retard mental ou encore chez les patients cérébrolésés, pourraient découler soit de la nature procédurale du système soit des contraintes cognitives générales.

Barrouillet *et al.*, (2004) ont réalisé des études pour tester le modèle ADAPT. La première était une étude développementale auprès d'enfants français de deuxième et troisième année d'école primaire (respectivement CE1 et CE2). Les résultats de cette étude ont confirmé ces prédictions. Cette étude fera l'objet de notre attention dans la deuxième partie de la thèse. La deuxième étude était réalisée auprès d'adolescents présentant des difficultés d'apprentissage. Cette étude présente un intérêt spécifique pour le modèle ADAPT qui suppose que l'un des mécanismes principaux du développement est le passage d'un transcodage algorithmique de toutes les formes à la récupération directe en mémoire des formes les plus fréquentes. Les résultats de cette étude ont amené à la mise en place de la version ADAPT_{LD} (*cf. supra*) et ont montré que ce modèle pouvait rendre compte de la diversité des parcours de développement.

Enfin, les auteurs du modèle ADAPT ont également étudié différents cas de patients cérébrolésés rapportés dans la littérature qui, après un apprentissage correct du transcodage, ont perdu cette habilité à la suite d'un accident ou de troubles neurologiques. Ces patients présentaient des difficultés de transcodage de la forme verbale en forme arabe (écrite en chiffres). Les auteurs ont tenté à localiser l'origine de leurs erreurs de transcodage. Certains points de ces deux dernières études vont être développés dans les études expérimentales

Les différents modèles de transcodage des nombres admettent que les informations, lexicales et syntaxiques d'un numéral, sont traitées séparément. Toutefois ils divergent en ce qui concerne le passage du code d'entrée au code de sortie c'est-à-dire sur la nécessité d'élaborer une représentation sémantique de la quantité entre ces deux codes.

Les modèles développés en neuropsychologie de l'adulte ont été utilisés pour l'analyse des performances d'enfants présentant une dyscalculie développementale. Néanmoins ces modèles ne réfèrent pas aux mécanismes d'acquisition des processus de transcodage. Dans la mesure où nous nous intéressons à la manière dont ces mécanismes se mettent en place chez les enfants ne présentant pas de déficit, ces modèles ne peuvent pas nous servir dans cette perspective.

L'acquisition du système de transcodage des nombres et son développement a été abordée pour la première fois dans le modèle ADAPT de Barrouillet *et al.*, (2004). Ce modèle a pu fournir des données en faveur d'une vue asémantique du transcodage (du code verbal au code en chiffres arabes) et une description des processus développementaux sous-tendant l'acquisition de ce système. Il a montré ses capacités à expliquer les erreurs produites chez les enfants et à rendre compte du développement du transcodage. De plus, concernant les études neuropsychologiques, ce modèle a montré à partir de simulations informatiques qu'il peut rendre compte, expliquer et reproduire les erreurs produites par des patients cérébrolésés (études de cas rapportés par la littérature). Nous analyserons donc nos résultats à la lumière de ce modèle qui a montré ses capacités à rendre compte du développement.

Par ailleurs, les modèles sémantiques ne peuvent pas expliquer la différence observée entre les erreurs produites par les enfants sur une chaîne numérique verbale transcodée seule ou au sein d'un nombre plus grand (Barrouillet *et al.*, 2004, enfants de 8 et de 9 ans). Prenons l'exemple du nombre « deux cent cinquante » qui, transcodé seul, provoque des erreurs

différentes que celles produites lorsqu'il fait partie d'un nombre plus grand (*e.g.* « quatre mille deux cent cinquante ». Les modèles sémantiques ne peuvent pas expliquer une telle différence puisque dans les deux cas « deux cent cinquante » renvoie à la même quantité: deux centaines et cinq dizaines. Le modèle ADAPT, asémantique et procédural, explique cette différence par le fait que ces nombres nécessitent la mise en œuvre de règles différentes.

Avec ses trois versions (ADAPT_{BASIC}, ADAPT_{LD}, ADAPT_{ADV}), ce modèle permet d'expliquer le développement du système de transcodage. Les études qui ont été réalisées dans le cadre du modèle ADAPT ont montré le pouvoir prédictif des deux versions du modèle (ADAPT_{LD}, ADAPT_{ADV}). Toutefois, aucune recherche n'a encore été faite sur la genèse de la version ADAPT_{BASIC} qui concerne les premiers apprentissages des nombres de base (de 1 jusqu'à 99) et les difficultés auxquelles sont confrontés les enfants effectuant le transcodage à ce niveau de développement. Ceci sera un point de préoccupation de notre thèse. Dans cet objectif, nous conduirons une première étude auprès des enfants français en première année de l'école élémentaire (CP), étude qui vise à explorer les connaissances de transcodage en tout début de l'apprentissage scolaire. Comme le postule ADAPT, nous vérifierons l'hypothèse que la difficulté de transcoder un nombre sera affectée par le nombre de règles que son transcodage nécessite. Nous vérifierons également l'impact de la structure verbale des nombres sur le transcodage ; plus la structure verbale est transparente (et phonologiquement courte) plus le passage de la forme verbale à la forme en chiffres est aisé.

Notre deuxième préoccupation visera à éclaircir la mise en place d'ADAPT_{BASIC}. Dans ce but, nous effectuerons une étude longitudinale (trois passations par niveau) avec des enfants français scolarisés en dernière année d'école maternelle (GS) et des enfants en (CP). Nous vérifierons l'hypothèse que le processus développemental repose sur le passage de l'algorithme à la récupération, ce qui devrait se traduire par une augmentation de l'efficacité du transcodage. La fréquence relative de certains nombres faciliterait leur acquisition et amènerait à la récupération directe de leurs formes en chiffres en mémoire.

Comme les systèmes numériques verbaux sont variés autant que les langues parlées, un modèle de transcodage doit pouvoir rendre compte du transcodage dans des langues différentes. Le modèle ADAPT est considéré comme indépendant des spécificités linguistiques et adaptable à d'autres langues. Il nécessite toutefois une modification des procédures ou de certaines d'entre elles. Ceci fera l'objet de notre troisième étude (inter-

linguistique). Nous vérifierons le transcodage numérique en langue allemande et arabe qui inversent toutes deux l'énonciation des nombres dizaines-unités (DU) et nous chercherons à identifier les difficultés qui peuvent être posées par une telle inversion sur le transcodage, notamment lorsque le sens d'énonciation contredit le sens naturel d'écriture. Nous supposons que la contradiction entre le sens d'énonciation et le sens d'écriture aurait un impact négatif sur le transcodage des nombres concernés. Nous confronterons les résultats obtenus auprès d'enfants Français aux résultats obtenus auprès d'enfants Allemands et Syriens scolarisés en première primaire (CP). Ainsi, nous proposerons les modifications des procédures à apporter au modèle ADAPT_{BASIC} français pour être adapté à ces deux langues (pour obtenir ADAPT_{BASIC} allemand & ADAPT_{BASIC} syrien).

Le modèle ADAPT étant impliqué dans l'architecture générale du système cognitif, des difficultés de transcodage peuvent parfois provenir des contraintes cognitives générales liées au fonctionnement du système comme la mémoire de travail (MDT). Selon ADAPT, la MDT joue un rôle très important dans le transcodage des nombres et elle est en constante interaction avec le système de production et la mémoire à long terme (MLT). Ce point fera l'objet de notre dernière étude qui vise à montrer que les différences inter-individuelles de la capacité de MDT peuvent faciliter *versus* freiner l'apprentissage du transcodage ; ceci pourrait se traduire par une avance ou un retard de l'apprentissage au début de la scolarité. Nous vérifierons cet impact de la capacité de MDT sur le transcodage auprès des enfants français provenant de deux niveaux scolaires : des enfants en (CP) en début de leur apprentissage scolaire, mais aussi chez les enfants de (CE1) qui ont un niveau de développement plus élevé.

2

**LE
DEVELOPPEMENT**

2.1. L'apprentissage de la chaîne numérique verbale

La chaîne de comptage, parlée ou écrite, constitue le premier instrument d'apprentissage des nombres. Son acquisition est déterminante pour les apprentissages arithmétiques et mathématiques ultérieurs. Elle est mémorisée à l'intérieur de la langue naturelle et appelée « chaîne numérale » : un, deux, trois, quatre...dix, onze, douze..., cent, cent un..., mille, mille un..., le zéro n'interviendra qu'ultérieurement.

La chaîne verbale orale s'acquiert à partir de l'âge de deux ans jusqu'à six ans. Cette acquisition est très variable d'un enfant à l'autre et d'une période à l'autre chez le même enfant. Fuson, Richards et Briars (1982) ont décrit trois parties dans les suites numériques produites par les enfants en cours d'apprentissage. La première, stable et conventionnelle, correspond à ce que produisent les adultes, l'enfant aborde la numération comme un bloc verbal sans signification. Cette partie se développe avec l'âge, surtout à partir de 4 ans et demi. La deuxième partie, stable et non conventionnelle, ne correspond pas à la séquence utilisée par les adultes, mais se reproduit à l'identique d'un essai à l'autre. Celle-ci concerne surtout les nombres entre 10 et 19 et les enfants jusqu'à 4 ans qui n'ont pas encore intégré les connaissances linguistiques ; ils utilisent donc la mémorisation de la suite numérique et non pas les règles combinatoires. La troisième partie, ni stable ni conventionnelle, change d'un essai à l'autre sans être cependant totalement aléatoire (certains éléments revenant plus fréquemment que d'autres).

Pour Fuson *et al.* (1982), la suite numérique se construit progressivement en commençant par un apprentissage par cœur de type sériel. Jusqu'à l'âge de 4 ans, l'enfant apprend par cœur les premiers éléments de la suite numérique qui sont les unités (de 1 à 9) et en français les particuliers (de 11 à 16). Cet apprentissage est donc lent et difficile et les différences interindividuelles sont faibles. Vers l'âge de 5 ans, le lexique numérique disponible augmente rapidement et certains enfants commencent à utiliser un système de dénomination fondé sur les règles de la combinatoire (syntaxe additive à partir du nombre 17 en français et plus tard une syntaxe multiplicative). A ce niveau, les différences interindividuelles augmentent entre les enfants utilisant déjà la combinatoire et ceux qui en sont encore à l'apprentissage par cœur. Les enfants de cinq ans présentent des niveaux différents d'organisation de la chaîne numérique. Ainsi, certains en sont au niveau qualifié par Fuson *et al.* (1982) de « chaîne insécable ». Les items, individualisés, ne peuvent être traités que suivant l'ordre strict dans lequel ils ont été appris. D'autres enfants ont déjà atteint le niveau « chaîne sécable ». L'entrée

dans la chaîne est alors possible à n'importe quel endroit. L'enfant peut compter « à partir de... » et « jusqu'à ... ». En principe, ce niveau est atteint par tous les enfants de six ans. A partir de 6-7 ans, les enfants peuvent compter « n » nombres à partir de « x » ou compter de « x » à « y », plus facilement en avant qu'à rebours. Ce niveau est appelé par Fuson, le niveau «chaîne terminale ou adulte» (pour une revue : Barrouillet & Camos, 2006).

Les irrégularités des systèmes numériques verbaux et la relation entre nombre et langue:

La numération orale est liée à la particularité de la langue parlée dans la vie actuelle. Il existe autant de chaînes numériques que de langues naturelles. Les enfants s'aperçoivent assez tôt qu'il existe des mots utilisés pour compter et d'autres non utilisés dans ce but (Sinclair & Sinclair, 1984, Droz 1991). L'acquisition de la chaîne numérique verbale de 1 à 100 commence donc très tôt (vers deux ans) et ne s'achève, dans la plupart des cas, qu'en fin de la première année de scolarité élémentaire. Cet âge varie d'un enfant à un autre en fonction de la diversité des stimulations fournies par son milieu socioculturel et les interactions avec la mère (Durkin, Shire, Riem, Crother et Rutter, 1986) ainsi qu'avec les pairs et les autres adultes (Hughes, 1985). Cependant, après quelques semaines de scolarité, ces différences disparaissent rapidement comme l'ont montré les recherches expérimentales (Ginsburg et Russel, 1981).

Par ailleurs, la suite des nombres de *un* à *cent* présente certaines irrégularités qui engendrent souvent des difficultés au début de l'acquisition de la chaîne numérique. Comme nous l'avons déjà signalé ci-dessus, l'acquisition des nombres de 1 à 9 et même jusqu'à 19 donne lieu à un apprentissage « par cœur » de type sériel. Ensuite la séquence de 20 à 99 (et au delà) suit une règle de composition linguistique dont la complexité varie d'une langue à l'autre (Fayol, 1990).

Généralement, les comparaisons inter langues attestent que la performance des enfants asiatiques (Chine, Corée, Japon, etc.) est supérieure aux enfants occidentaux dans des épreuves d'arithmétique, même avant de recevoir l'enseignement systématique à l'école. Cette supériorité paraît due, au moins en partie, au fait que les systèmes verbaux chinois, coréen et autres venus de l'Extrême Orient présentent une régularité de dénomination verbale (reflétant bien la structure décimale) des nombres entre dix et cent. Par exemple le nombre « vingt-

« cinq » est construit en énonçant successivement le nombre de dizaines « deux dix » et le nombre d'unités « cinq » soit « deux dix cinq » (Tableau 2.1.2).

Tableau 2.1.2 : Exemples d'expression numérique verbale en Français, Anglais et Chinois (Fayol, Camos, Roussel, 2000)

	Français	Anglais	Chinois
1	un, une	one	yi
2	deux	two	er
3	trois	three	san
10	dix	ten	shi
11	onze	eleven	shi yi
12	douze	twelve	shi er
13	treize	thirteen	shi san
20	vingt	twenty	er shi
21	vingt et un	twenty-one	er shi yi
22	vingt-deux	twenty-two	er shi er
23	vingt-trois	twenty-three	er shi san

Cette structuration facilite donc l'acquisition et l'utilisation de la suite verbale des noms de nombres chez les jeunes asiatiques, alors que la structure de cette même suite contraint les enfants occidentaux en général et français en particulier à un apprentissage par cœur qui entraîne un retard croissant par rapport aux jeunes asiatiques. L'apprentissage des noms des nombres, qui est, de un à dix, aussi lente et difficile pour les enfants asiatiques que pour les enfants occidentaux, devient ensuite plus difficile pour ces derniers (Miura *et al.*, 1994).

Le système numérique verbal **français** présente des particularités qui le rendent difficile à acquérir. Il lexicalise les cardinalités allant jusqu'à seize, les dizaines de vingt à soixante, cent, mille, million et milliard. Il repose ensuite sur une syntaxe codant des relations additives jusqu'à 79 (*e.g.*, « vingt-cinq » = vingt + cinq, « soixante-dix » = soixante + dix) et enfin sur une syntaxe combinant les relations additives et multiplicatives (*e.g.*, « quatre-vingt dix » = quatre x vingt + dix, ou « quatre cent six » = quatre x cent + six). Ainsi, la base dix qui structure le système n'apparaît pas immédiatement avec la première dizaine. De « onze » jusqu'à « seize » on trouve une transcription implicite de dizaines et d'unités de type « un – ze » pour onze ou « six – ze » pour seize, où « ze » marque les dizaines comme « teen » en anglais. Après le nombre « seize », l'énonciation change pour être plus transparente « dix-sept », « dix-huit » et « dix-neuf » où la valeur de dizaine est énoncée explicitement et avant la valeur de l'unité. De même, on pourrait remarquer aussi que de trente jusqu'à soixante la terminaison « – ente » ou « – ante » joue le rôle multiplicatif et remplace l'énonciation « trois-

dix » par exemple, qui pourrait mieux refléter la base dix, par « trente ». En outre, on retrouve encore dans le système numérique verbal français des traces historiques de la base sexagésimale dans l'énonciation des nombres de 70 à 79 (e.g., « soixante et onze » pour « 71 ») et de la base vingt dans l'énonciation des nombres de 80 à 99 (e.g., « quatre-vingt quatorze » pour « 94 »). En conséquence, les jeunes Français doivent apprendre par cœur la suite des dénominations, au moins jusqu'à 16. Au-delà, le système verbal devient plus régulier: dix-sept, vingt-cinq, jusqu'à 69 où il devient de nouveau irrégulier et complexe. Cette irrégularité de dénomination verbale dans le système numérique français rend la performance des enfants Français inférieure à celle des jeunes Chinois dès que ceux-ci doivent compter au delà de dix (Fuson & Kwon, 1991; Miller, Smith, Zhu & Zhang, 1995; Fayol, 2005)

De même, d'après Miller *et al.*, (1995), à 3 ans, les enfants chinois et anglais comptent aussi bien jusqu'à 10 (les mots nombres de un à dix nécessitent un apprentissage par cœur et dans l'ordre de succession). Par contre, à 4 et 5 ans, les jeunes Chinois comptent mieux et plus loin que leurs pairs anglophones. Cette supériorité persiste tout au long de la scolarité élémentaire, voire au-delà, si des activités spécifiques ne sont pas mises en place (Geary, Salthouse, Chen & Fan, 1996; Stevenson, Stigler, Lee, Lucker, Kitamura & Hsu, 1985 ; Stevenson, Lee & Stigler, 1986).

Par ailleurs, les jeunes Français de France plus spécifiquement se trouvent encore plus défavorisés que leurs pairs Belges francophones ou Suisses Romands. En effet, les irrégularités de dénomination verbale en France à partir de « soixante-dix » et jusqu'à « quatre-vingt dix-neuf », ajoutent de nouvelles difficultés qui se traduisent par des nombreuses erreurs et ralentissent l'apprentissage (Seron & Fayol, 1994 ; Fayol, Camos & Roussel, 2000). La dénomination verbale passe de la forme additive à la forme multiplicative et additive : quatre-vingt dix-huit, c'est quatre noms de nombres pour désigner un nombre à deux chiffres (« 4×20 » + $10 + 8$). La Suisse et la Belgique ont résolu le problème en désignant ces dizaines par différents noms : « septante » au lieu de « soixante-dix », [« huitante » (canton de Vaux) au lieu de « quatre-vingt »] et « nonante » pour « quatre-vingt dix », ce qui permet la poursuite de l'algorithme additif de la suite des nombres.

Cette absence de transparence de la base dix dans les langues occidentales a ensuite un impact négatif sur l'apprentissage de la numération écrite. Ainsi, plus la correspondance orale - écrite

est régulière et transparente comme en chinois, coréen ou japonais, plus l'acquisition de la numération écrite est facile et rapide.

Dans le contexte interculturel il nous semble intéressant de signaler quelques zones d'irrégularités numériques pour les premiers nombres dans certaines langues : en *espagnol* et en *portugais*, la régularité apparaît à partir de seize ; en *anglais* et en *allemand*, elle apparaît à partir de treize (les irrégularités portent sur les nombres 11 et 12 : *elf*, *zwölf* en allemand, et *eleven*, *twelve* en anglais). En *italien*, la numération orale est additive avec une particularité : la règle d'énonciation change à dix-sept où l'on commence par énoncer la dizaine et ensuite l'unité (*diciassette* $17 = 10+7$, *diciotto* $18 = 10+8$ et *diciannove* $19 = 10+9$). Malgré cette modification à dix-sept, la numération orale conserve son caractère additif.

Enfin la numération orale en *arabe* repose essentiellement sur des relations additives ($11 = 1+10$, $12 = 2+10$... $21 = 1+20$). Cependant, lors de la lecture des nombres « dizaines » on commence par lire les unités et ensuite les dizaines, alors que pour les centaines et les milliers, la lecture commence d'abord par les centaines, ensuite les unités et enfin les dizaines (e.g., pour 152, on lit : 100, puis 2 et enfin 50). En revanche, l'écriture numérique se fait de gauche à droite en général, alors que l'écriture alphabétique s'effectue de droite à gauche (ce système sera expliqué en détail dans la troisième partie de la thèse).

2.2. Les études antérieures sur le transcodage

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'acquisition du système numérique arabe, nécessite un enseignement systématique. En effet, peu d'études ont été consacrées au transcodage des nombres chez les enfants. La première étude était celle de Power et Dal Martello (1990) qui ont étudié le transcodage des nombres à 1 jusqu'à 6 chiffres sous dictée, chez 15 enfants italiens âgés de sept ans. La plupart des enfants ont transcodé parfaitement les nombres à un et deux chiffres et ont été incapables d'écrire des nombres à 5 et 6 chiffres (pour des résultats similaires avec des enfants belges (Noël & Turconi, 1999)). Ainsi, les auteurs ont focalisé leur analyse sur les nombres à 3 et à 4 chiffres, sur lesquels les enfants ont produit 54% d'erreurs. La plupart de ces erreurs sont principalement liées aux relations de somme qui nécessitent ce que, dans leur modèle, ils appellent une règle de sur-écriture. Par exemple, « cent six », renvoie à $C100 + C6 = \langle 100 \rangle \# \langle 6 \rangle = 106$, (# veut dire écrit sur le zéro en commençant à droite), peut être écrit 1006 par des enfants. En revanche, les auteurs n'ont observé aucune erreur dans les relations de produit qui sont selon ces auteurs maîtrisées avant les relations de somme, (e.g, deux cents, $C2 \times C100 = \langle 2 \rangle \& 00 = 200$ qui exige une règle de concaténation¹³). Seron, Deloche et Noël (1991) ont suivi une approche longitudinale pour dégager les différentes étapes d'acquisition chez les jeunes enfants de 2^{ème} et de 3^{ème} primaire. A la différence de Power & Dal Martello (1990), ils ont observé des erreurs non seulement dans les relations de somme mais aussi dans les relations de produit (e.g., écrire « 2100 » pour « deux cent ») chez les plus jeunes enfants. En général, les deux formes « Cent X » (e.g., cent vingt) et « U cent » (e.g., deux cents), conduisent au transcodage littéral (10020 et 2100) pour lequel chaque portion de la chaîne verbale est transcodée et concaténée. Pour des enfants plus âgés, et en accord avec Power & Dal Martello (1990), la relation de produit était maîtrisée tandis que la relation de somme continuait d'être transcodée littéralement. A ce niveau, le transcodage des formes « cent P » (e.g., cent treize) ou « cent D » (e.g., cent trente »), fait apparaître un nouveau type d'erreurs : par exemple « cent trente » transcodé comme « 1030 », « cent treize » comme « 1013 » et « mille vingt » comme « 10020 ». Les auteurs ont expliqué ces erreurs par une généralisation inadéquate des règles de transcodage récemment acquises, c'est-à-dire, les règles de transcodage concernant les structures « cent U ». Par exemple, en se basant sur le transcodage de la forme « cent U », qui représente une forme pivot à partir de

¹³ C'est la façon avec laquelle les auteurs expliquent les règles, ainsi « C » sert à distinguer les concepts sémantiques des formes arabes.

laquelle une règle de type « cent x = 10 x » est appliquée : « cent huit » étant transcodé « 108 », « cent quinze » sera transcodé « 1015 ».

Dans une autre étude longitudinale, Seron et Fayol (1994) ont également rapporté des erreurs dans les relations de produit chez 20 enfants en 2^{ème} primaire (âge moyen de sept ans) parlant français. Les enfants transcrivaient, par exemple, « deux cents » en « 2100 ». Par ailleurs, les auteurs ont souligné une importante variabilité dans les productions des enfants (inter et intra individuelle, voir aussi Sullivan, Macaruso, et Sokol, 1996). C'est-à-dire, dans une même session, un enfant peut transcoder le nombre « cent-douze » comme « 10012 » ou « 1012 » ou encore correctement comme « 112 ». Les auteurs s'intéressaient à identifier l'origine de difficultés révélées par les enfants, en se basant sur le modèle de McCloskey *et al.* (1985) développé en neuropsychologie. Ainsi, les enfants ont été évalués sur plusieurs tâches testant la compréhension des nombres oraux ainsi que la production des nombres arabes. Les résultats ont montré que la performance des enfants était supérieure sur les tâches de compréhension des numéraux oraux que sur les tâches de production des nombres arabes. Ces auteurs ont aussi comparé des enfants français et des enfants belges de 8 ans. Les enfants français qui utilisent une dénomination irrégulière pour 70 (« soixante-dix ») et 90 (« quatre-vingt-dix ») faisaient plus d'erreurs en écrivant ces dizaines (« soixante-dix-huit » transcodé « 6018 ») que les enfants belges qui utilisent des dénominations régulières « septante » pour « 70 » et « nonante » pour « 90 ». Les auteurs ont conclu que les difficultés éprouvées par les enfants dans les tâches d'écriture des nombres arabes sous dictée sont dues à l'étape de production d'un numéral arabe et que des erreurs régulièrement produites sont mieux expliquées par le modèle de Power et Dal Martello (1991), qui considère la structure lexicale du nombre, que par le modèle de McCloskey.

Jarlegan, Fayol et Barrouillet (1996) ont fait une étude avec des enfants de CE1 (âgé de 8ans en moyenne). Ils font faire à ces enfants tous les transcodages possibles entre le code verbal, le code arabe et le code analogique sémantique en construisant des représentations picturales (carrés = 1; barres = 10; plaques = 100; cubes = 1000) à partir de codages alphabétiques (épreuve 1) ou digitaux (épreuve 2). Ces épreuves permettent de tester la compréhension des notations, respectivement alphabétiques et digitales. Les résultats ont montré des écarts importants de performance pour le transcodage du code verbal au code arabe, les enfants obtiennent 82% de réussite. D'autre part, ils ont 63% de réussite lors du transcodage du verbal au sémantique, et 84% pour celui de l'analogique au code arabe. Si les enfants passaient

obligatoirement par le code analogique, *i.e.*, le sens du nombre, avant de l'écrire en code arabe, les performances de transcodage du code verbal au code arabe devraient être de 73%, (moyenne de 63% et 84%) bien inférieures de celles observées. Ces résultats sont en faveur des modèles asémantiques et mettraient en difficulté le modèle de McCloskey *et al.*, (1985) et celui de Power et Dal Martello (1990). Les résultats ont montré également, comme dans les premiers travaux de Seron et Fayol (1994), que les irrégularités du code verbal français, notamment pour les dizaines complexes et pour les nombres les incluant, étaient à l'origine de la faiblesse des performances.

Fayol, Barrouillet et Renaud (1996) ont plus spécifiquement étudié les difficultés rencontrées par des adolescents suivant ou non une scolarité normale dans des transcodages du code verbal en code arabe portant sur des nombres de 2 à 6 chiffres. Les résultats ont montré que les difficultés provenaient essentiellement d'une part, de la longueur phonologique des formes orales (évaluée en nombre de syllabes) et de la taille des nombres arabes en nombre de chiffres. Ces données ont suggéré donc la possibilité de traiter le transcodage dans le cadre d'un modèle de mémoire de travail simultanément soumis à des contraintes de stockage et de traitement. Ce modèle aurait l'avantage d'intégrer les faits rapportés dans la littérature neuropsychologique et ceux qui émanent de recherches sur le développement. Ces premiers résultats confirmaient l'intérêt d'une telle approche.

Enfin, Sullivan, Macaruso, et Sokol (1996) ont étudié le transcodage chez des enfants anglophones de troisième et quatrième grade d'école primaire (CE2 et CM1) et de première classe de collège (âge moyen : respectivement entre 7 et 8 ans, entre 8 et 9 ans et enfin entre 12 et 13 ans). Les enfants devaient transcoder des nombres de 3 à 6 chiffres (28 nombres, 14 pour le groupe le plus jeune). Leur objectif initial était d'obtenir des données de contrôle pour apporter une remédiation¹⁴ à un patient adolescent (CM, 13 ans) présentant une dyscalculie développementale qui n'arrivait à transcoder que 50% des formes verbales en formes arabes. Ses erreurs étaient en majorité syntaxiques.

Bien qu'aucun test statistique n'ait été rapporté, le pourcentage d'erreurs diminuait avec l'âge de 50% pour les enfants de 3^{ème} grade primaire (CE2), 21% pour ceux de 4^{ème} grade primaire (CM1), à 2% à l'âge de 12/13 ans. La taille des nombres (en nombre de chiffres) affectait

¹⁴ Sullivan *et al.*, (1996) ont conduit une rééducation basée sur les propositions théoriques du modèle de McCloskey (1985). Ils ont noté que les difficultés de CM se trouvent au niveau de la production des chiffres arabe.

aussi ce pourcentage d'erreurs. Comme le patient CM, les enfants n'ont pas montré une difficulté importante de transcodage pour les nombres de 3 et 4 chiffres. Les grands nombres (5 et 6 chiffres) provoquaient plus d'erreurs que les petits. Cette difficulté était plus élevée pour les enfants de 3^{ème} grade que ceux de 4^{ème} grade et disparaissait à 12 ans. La majorité de ces erreurs était syntaxique et conduisait à produire des chaînes plus courtes ou égales à la chaîne correcte. Seulement deux enfants ont produit de façon consistante des chaînes plus longues que la chaîne correcte. Les auteurs ont mentionné une inconsistance dans les erreurs syntaxiques produites par les enfants et celles de CM en termes de longueur du nombre « seulement très peu d'enfants ont produit de façon consistante des réponses erronées qui se conforment aux règles de concaténation proposées par Power et Dal Martello (1990) ou aux processus de transcodage littéral de Seron *et al.* (1991) » (p.50). Cette performance inconsistante de ces enfants ainsi que celle du patient CM, contredit donc la performance consistante des enfants décrits dans l'étude de Power & Dal Martello (1990) et Seron *et al.*, (1991). Selon les auteurs, ce désaccord avec les études antérieures pourrait être dû à des différences de matériel et de procédure, mais aussi à la différence d'âge et à un degré élevé de variabilité individuelle.

En résumé, ces études ont étudié le transcodage à partir de deuxième classe d'école primaire. Elles se sont basées principalement sur les modèles développés en neuropsychologie des adultes pour expliquer les erreurs des enfants. Elles ont montré que le transcodage des nombres de leur forme verbale en leur forme en chiffres est un processus qui requiert un apprentissage de plusieurs années chez les enfants. Ils ont montré aussi que les erreurs produites sont généralement de majorité syntaxique, liées principalement à l'étape de production de numéraux arabes. En outre, lorsque les enfants étaient confrontés à des nouvelles formes, ils se référaient au transcodage de structures déjà maîtrisées et utilisaient les règles dérivées de cette maîtrise pour transcoder ces nouvelles formes. Les différences individuelles n'avaient pas été assez évaluées. Généralement, bien que ces études fournissent une idée précieuse sur les premières étapes du transcodage à travers l'apprentissage et le développement, les données rapportées dans la littérature semblent néanmoins inconsistantes.

Barrouillet *et al.*, (2004) ont réalisé des études pour tester le modèle ADAPT. La première était une étude développementale auprès d'enfants français en apprentissage. Les auteurs ont testé 410 enfants français scolarisés en deuxième et troisième grade d'école primaire (cours élémentaire 1^{ère} et 2^{ème} année) âgés de 8 à 9 ans. Une tâche de dictée de 92 nombres (à 2, 3 et

à 4 chiffres) a été effectuée. En accord avec les études précédentes, les résultats ont montré que les enfants les plus jeunes produisent plus d'erreurs (56%) que les enfants les plus âgés (9%) et les erreurs syntaxiques étaient plus fréquentes que les erreurs lexicales (73% et 12% respectivement, en total pour les deux groupes d'âge). Comme le modèle ADAPT le prédit, la difficulté de transcoder un nombre dépendrait du nombre de règles nécessaires pour son transcodage. Ainsi, les règles de transcodage d'ADAPT_{ADV} ont été appliquées sur les nombres dictés. Les résultats ont montré que le pourcentage d'erreurs produites par les enfants était fortement corrélé avec le nombre de règles proposées par le modèle. Ceci était valable également pour la version ADAPT_{LD} qui prend en considération la difficulté liée aux nombres complexes en français (de 70 à 99). Une erreur syntaxique a été définie comme une erreur qui affecte la taille du nombre, incluant tous les chiffres autres que zéro mais avec une addition ou suppression des zéros (*e.g.*, écrire « 30080 » pour « trois cents quatre vingt ») ou des « un » (*e.g.*, écrire « 5100 » pour « cinq cents »). Une erreur lexicale correspondait à l'écriture d'un nombre de chiffres correct mais en remplaçant un chiffre ou plus de la réponse correcte par d'autres (*e.g.*, écrire « 9354 » pour « neuf mille trois cents **soixante**-quatre »).

Le modèle prédit que les erreurs dans les relations de produit constitueraient le niveau le plus primitif du développement de transcodage. Lorsque la règle responsable de transcoder « cent », comme un séparateur (*i.e.*, P2b), n'est pas disponible, le « parser » isole et identifie les unités pour lesquelles il existe une forme en chiffres stockée en MLT et peut être récupéré. Ainsi le « parser » identifie « cent » comme unité représentationnelle et la forme correspondant en chiffres « 100 » sera récupérée. Dans ce cas là, un nombre comme « deux cent trois » sera transcodé comme « 21003 », donnant lieu à un transcodage littéral complet. Cette connaissance déclarative concernant la forme en chiffres de « cent », et probablement d'autres formes « unité cent » (U cent), pourrait provoquer une règle primitive de transcodage de « cent » qui ajoute deux zéros après le « 1 ». Une telle règle incorrecte devrait à son tour provoquer des erreurs de transcodage dans les relations de somme et conduire à un transcodage littéral partiel (*e.g.*, « 2003 » pour « deux cents trois »). A la suite de cette étape, une règle correcte de transcodage de « cent » pourrait être construite qui ajoute deux cases vides au lieu d'ajouter des zéros (*i.e.*, P2a et P2b en ADAPT_{ADV}).

Les résultats de l'étude développementale d'ADAPT ont confirmé ces prédictions. Les enfants de deuxième année d'école primaire ont produit essentiellement des erreurs de transcodage littéral partiel et complet. Le transcodage littéral partiel était le plus fréquent sur tous les nombres à 3 chiffres et sur 98% des nombres à 4 chiffres sauf les formes « U cent »

(e.g., « 300 ») et « U mille » (e.g., « 2000 ») sur lesquelles le transcodage littéral complet était le plus fréquent. Ainsi, globalement, pour les nombres à trois et à quatre chiffres, les erreurs produites par les enfants (e.g., écrire « 90068 » pour « neuf cent soixante-huit » ou « 6004 » pour « six cents quatre ») ressemblent à celles rapportées dans l'étude de Power et Dal Martello (1990). Toutefois pour les formes « U cent » et « U mille », les erreurs observées correspondant à un transcodage littéral complet (e.g., écrire « 3100 » pour « trois cents ») sont plutôt en accord avec les observations de l'étude de Seron et Fayol (1994). Ainsi comme le prédit ADAPT les enfants ont produit des erreurs qui ne touchaient pas seulement les relations de somme mais aussi les relations de produit. Ces erreurs sont interprétées par ADAPT comme étant dues à un système de transcodage partiellement construit. L'erreur de transcodage littéral complet qui touchait les relations de produit était fréquente et indiquait un niveau de développement primitif. Ainsi cette erreur n'était produite que par les enfants les moins avancés (en comparant les enfants du même niveau scolaire cf. Barrouillet *et al.*, 2004, p.379). Cependant, les enfants les plus avancés continuaient à faire des erreurs dans les relations de somme.

Une chute remarquable de pourcentage d'erreurs a été observée chez les enfants du niveau scolaire suivant (troisième année d'école primaire, CE2) qui suggérait que le système de transcodage était presque acquis. Les erreurs de transcodage littéral complet et partiel ont diminué aussi. L'erreur la plus fréquemment observée à ce niveau était l'ajout d'un zéro après le « 1 » de « cent » ou de « mille » (e.g., écrire « 3080 » pour « trois cent quatre-vingt » et « 70510 » pour « sept mille cinq cent dix »). Ainsi la chute du pourcentage d'erreurs et le changement de leur nature suppose qu'elles sont dues à un dysfonctionnement du système de transcodage dans lequel les règles responsables du traitement des séparateurs sont récemment acquises.

En outre, concernant les formes simples de DU, les résultats ont confirmé les prédictions du modèle ADAPT qui suppose qu'elles doivent être récupérées directement en MLT et conduisent donc à produire le même pourcentage d'erreurs que les autres primitives lexicales comme les dizaines (D). En effet, le transcodage des formes (DU) et les formes (D) dictées ont conduit à produire un pourcentage d'erreurs similaires, non seulement lorsqu'elles étaient dictées isolément, mais aussi lorsqu'elles faisaient partie de nombres plus grands. Ces résultats ont été trouvés aussi bien chez les enfants en deuxième année d'école primaire (CE1) que chez ceux de troisième année (CE2). Ceci est à l'opposé des prédictions des modèles

précédents qui postulent que le transcodage des formes dizaines unités (DU) doit être plus difficile que celui des dizaines, particuliers et les unités. Par exemple, Power et Dal Martello (1990, 1997) ont postulé que le transcodage des formes (DU) nécessite une règle de sur-écriture pour remplacer le zéro 0 de la dizaine (ex 40) par l'unité (ex 5 →45). De même, Deloche et Seron (1987) ont supposé que le transcodage des formes (DU) nécessite deux étapes distinctes ; une pour la dizaine et l'autre pour l'unité.

Par ailleurs, une contradiction de prédictions se trouve aussi sur les grands nombres finissant par les formes (DU, D ou U). En effet, concernant ces nombres, Power et Dal Martello (1990, 1997) ont supposé que le transcodage d'un nombre comme « 9364 » conduirait à produire plus d'erreurs que le transcodage de « 9250 » ou « 9704 » ; le premier nombre nécessitant une règle de sur-écriture additionnelle par rapport aux deux derniers qui se terminent par des primitives lexicales (50 et 4 respectivement). Par contre, ADAPT prédit que les grands nombres se terminant par une forme unité (U) (e.g., « 9704 » conduirait à produire plus d'erreurs que les deux autres se terminant par une forme dizaine ou dizaine-unité (e.g., « 9250 » ou « 9364 »). Malgré qu'il suppose une récupération directe en MLT pour ces formes terminales, le premier nombre (« 9704 ») nécessite une règle additionnelle P4b pour remplir la case vide par 0. Ces prédictions d'ADAPT ont été confirmées dans l'étude développementale ; le pourcentage d'erreurs de transcodage des nombres se terminant par une forme (U) était significativement plus élevé que celui des nombres se terminant par (DU) ou (D). La comparaison ensuite entre ces deux derniers n'a pas montré une différence significative.

Contrairement aux modèles sémantiques¹⁵, l'étude réalisée pour tester le modèle ADAPT a mis en évidence des erreurs différentes entre deux chaînes verbales dont l'une contient l'autre (ex : 250 et 4250). Les erreurs sont différentes car ces deux nombres nécessitent la mise en œuvre de règles différentes puisque l'état du système est modifié par la présence de « quatre mille ». Ainsi selon ADAPT_{ADV} pour transcoder le nombre « deux cent cinquante » il faut appliquer les règles (P2b, P1) alors que pour transcoder « quatre mille deux cents cinquante » il faut appliquer (P3b, P2d, P1). Ces résultats montrent que le modèle ADAPT rend compte des performances et des capacités des enfants en apprentissage.

¹⁵ Les modèles sémantiques postulent que « deux cent cinquante » devrait être transcodé de la même façon, que cette chaîne soit dictée isolément ou au sein d'un nombre plus grand tel que « quatre mille deux cent cinquante », puisque dans les deux cas « deux cent cinquante » renvoie à la même quantité: deux centaines et cinq dizaines.

En résumé, les prédictions principales du modèle ADAPT concernant les aspects développementaux ont été confirmés dans leur étude développementale. Le nombre de règles nécessaires pour transcoder un nombre prédit fortement le nombre d'erreurs produites par les enfants (lorsque la version ADAPT_{ADV} qui récupère les formes DU en mémoire a été appliquée). Les jeunes enfants de deuxième grade (CE2) passent du transcodage algorithmique à la récupération des formes DU en mémoire. Toutefois, ils n'avaient pas encore acquis un système de transcodage complet. Les types d'erreurs observés étaient conformes avec une perspective asémantique de transcodage. Comme l'étude l'a montré, les mêmes nombres ne donnaient pas les mêmes types d'erreurs lorsqu'ils étaient transcodés seuls que lorsqu'ils faisaient partie des nombres plus grands.

2.3. Etude exploratoire sur des enfants de CP (de 6 ans)

La production des chiffres sous dictée

Introduction:

Comme nous avons pu le voir, les études antérieures ont débuté leurs investigations auprès des enfants de CE1 (ou deuxième année d'école primaire). Or, le modèle ADAPT propose une version rendant compte des premières étapes d'apprentissage (ADAPT_{BASIC}). Afin d'établir la plausibilité de cette version, nous allons étudier le transcodage du code verbal en code arabe, autrement dit, l'écriture en chiffres de nombres dictés, auprès des enfants de CP (première année d'école primaire) au début de l'apprentissage scolaire. Dans la mesure où notre étude est la première à étudier le transcodage à cet âge, elle garde une nature exploratoire.

Dans la présente étude, 187 jeunes enfants de classe de CP (d'âge moyen 6;7 ans) au tout début de leur apprentissage scolaire ont transcodé 50 nombres (de un à trois chiffres et un seul nombre à 4 chiffres: « mille ») de leur forme verbale dans leur forme en chiffres arabes. La majorité des nombres dictés était de deux chiffres. Quelques nombres étaient de 3 chiffres afin de vérifier si les enfants de cet âge étaient capables de les transcoder avant même qu'ils soient enseignés systématiquement à l'école (l'enseignement des nombres en CP s'arrête à 99). Des nombres à un chiffre ont également été dictés afin de détecter des difficultés anormales, comme le propose Noël et Turconi (1999). La dictée de nombres nous permet d'examiner le passage du code verbal au code digital, de mesurer le taux d'erreurs et le taux de non-réponses, d'analyser les différents types d'erreurs et de vérifier la mémorisation de certains grands nombres préalable à la compréhension comme pour les nombres (100 et 1000).

Cette étude avait pour but, d'explorer les connaissances du transcodage auprès des enfants en début de l'apprentissage scolaire et les difficultés auxquelles ils étaient confrontés. Nous nous intéressons à repérer les prédicteurs d'erreurs produites par les enfants lors du transcodage numérique en début d'apprentissage scolaire et l'acquisition du mécanisme de transcodage du

code verbal au code en chiffre arabe. Nous analysons les différents types d'erreurs en essayant de les expliquer par le dernier modèle de transcodage numérique (ADAPT), et d'identifier l'origine probable des difficultés que rencontrent les enfants à cet âge dans les tâches de transcodage.

En accord avec les prédictions du modèle ADAPT, nous nous attendions à ce que le nombre d'erreurs de transcodage soit affecté par le nombre de règles que le transcodage exige. Ainsi, plus le nombre a besoin de règles pour être transcodé, plus la possibilité d'erreurs est élevée. En effet, lorsqu'une chaîne verbale correspond à une unité représentationnelle stockée en mémoire à long-terme, cette chaîne est transcodée par la récupération directe en mémoire de sa forme en chiffres. Par contre, lorsque cette récupération en mémoire échoue, un transcodage algorithmique (utilisant des procédures) sera effectué. Ainsi, comme le transcodage algorithmique implique l'application de plusieurs règles, chaque règle pourrait être une source probable d'erreur. Par contre, la récupération en mémoire comporte une seule règle, ce qui réduit la probabilité de produire une erreur. Le transcodage algorithmique utilisé par ADAPT constitue une stratégie de recul utilisée lorsqu'une récupération directe en mémoire (de la totalité de la chaîne verbale ou de ses parties) échoue (Siegler & Shrager, 1984). Deux raisons peuvent induire un échec de récupération : soit parce que la forme en chiffres n'est pas stockée en mémoire à long-terme (si elle n'a jamais été perçue auparavant), soit parce que l'association entre la forme verbale et la forme en chiffres n'est pas suffisamment forte. Selon ADAPT, une difficulté de la récupération directe en mémoire amène à produire des erreurs lexicales, alors qu'un échec du transcodage algorithmique amène à produire des erreurs syntaxiques.

En ce qui concerne la taille des nombres, les données de Cipoloti, Butterworth & Warrington (1994), de Noël et Seron (1995), de Fayol, Barrouillet, Renaud (1996), montrent que les pourcentages d'erreurs augmentent avec la taille des nombres (nombres de chiffres). Cette augmentation peut provenir du fait que la gestion de la notation positionnelle est d'autant plus difficile que le nombre de chiffres à transcrire s'élève. Ainsi, nous supposons que le nombre de chiffres composant un nombre a un effet sur la difficulté de son transcodage et par conséquent le nombre d'erreurs produites par les enfants. Plus le nombre de chiffres composant un nombre est grand, plus le nombre d'erreurs de son transcodage augmente.

Par ailleurs, comme la chaîne verbale entendue est stockée temporairement dans une mémoire phonologique tampon (nommée buffer dans le modèle ADAPT), la difficulté de ce stockage dépend du nombre de syllabes et de leur degré de similarité phonologique (Baddeley, 1986 ; Eriksen, Pollack & Montague, 1970 ; Klapp, 1971). Ce maintien est indispensable pour que les sujets effectuent le découpage (parsing) de la chaîne numérique verbale (e.g., /katrevinkatr/ → /katre// vinkatr' / vs. /katrevin// katr'/) et le transcodage. Fayol *et al.*, (1996) ont montré que les difficultés de transcodage dans leur étude menée auprès d'adolescents provenaient aussi de la longueur phonologique de la forme orale évaluée en nombres de syllabes. Ainsi, nous nous intéressons à vérifier cet impact de la longueur phonologique - évaluée en nombres de mots - sur le transcodage chez les enfants de CP. Nous faisons l'hypothèse que plus la forme verbale du nombre est longue (nombres de mots), plus le nombre d'erreurs de transcodage augmente.

En outre, selon ADAPT, les formes DU seraient très précocement stockées en mémoire à long-terme et ne seraient donc plus transcodées de façon algorithmique. Ainsi, ces formes devraient conduire à des performances similaires à celles obtenues pour des formes explicitement apprises telles que les dizaines. Nous ne nous attendons donc pas à une différence significative entre les Dizaines (D) et les dizaines-unités (DU).

Méthode

Participants

Cent-quatre-vingt-sept enfants des classes de CP (90 filles) de neuf écoles de la région Bourgogne ont participé à cette étude. La majorité des enfants était née en 1999, (âge moyen 6 ; 7 ans, écart-type : 4 mois). Trois autres enfants ont été éliminés de l'échantillon car ils n'étaient présents qu'à la première session expérimentale.

Matériel

Cinquante nombres ont été dictés. Cinq nombres étaient à un chiffre (entre 1 et 9), 37 à deux chiffres (entre 10 et 99), 7 à trois chiffres (entre 100 et 220 inclus) et un séparateur à quatre chiffres (1000). Les nombres ont été choisis en fonction de leur structure lexicale et se répartissent en 9 catégories : des unités (U), des particuliers (P), des dix-unités (dix-U), des

dizaines simples (Ds) c'est à dire les dizaines inférieures à 70, des dizaines unités simples (DUs) c'est-à-dire les dizaines unités inférieures à 70, des dizaines complexes (Dc) c'est à dire les dizaines supérieures à 70 ; (70, 80, et 90), des dizaines unités complexes (DUc) c'est à dire les dizaines unités supérieures à 70, des centaines, des séparateurs (cent et mille). Ainsi, chacun des nombres dans ces catégories demande des règles spécifiques de transcodage selon le modèle ADAPT (Barrouillet *et al*, 2004) (voir Annexe 3).

Procédure

La tâche de dictée a été administrée collectivement. Cinquante nombres ont été dictés dans deux ordres aléatoires différents. La moitié des enfants voyait un des deux ordres (Annexe 2). Chaque enfant recevait une grille de réponse contenant 50 dessins d'animaux différents organisés en deux colonnes, pour aider l'enfant à se repérer pendant la dictée (Annexe 1). Dans cette grille, l'enfant devait écrire sa réponse successivement dans les cases appropriées. Ainsi, avant de dicter chaque nombre, l'expérimentateur précisait le dessin à côté duquel il fallait l'écrire. Chaque nombre était répété deux fois. L'expérimentateur vérifiait que chaque enfant avait eu le temps d'écrire sa réponse avant de dicter le nombre suivant. La dictée se déroulait en deux sessions expérimentales, où 25 nombres étaient dictés à chaque fois.

Résultats

Statistiques descriptives

Le transcodage des 50 nombres a conduit à 2933 erreurs au total, c'est-à-dire 31% d'erreurs (écart-type = 23) sur les 50 nombres dictés, incluant 13% de non-réponses (écart-type = 6.2). Très peu d'erreurs (2%) ont été produites sur les nombres à un seul chiffre (les unités). Ces erreurs correspondaient plutôt à des non-réponses. Sur les nombres à deux chiffres, les enfants ont produit 30% d'erreurs. Ces résultats rejoignent les observations antérieures (Barrouillet *et al*. 2004 ; Power et Dal Martello, 1990 ; Seron et Fayol, 1994 ; Seron *et al.*, 1991), beaucoup d'erreurs (60%) ont été produites sur les nombres à trois chiffres.

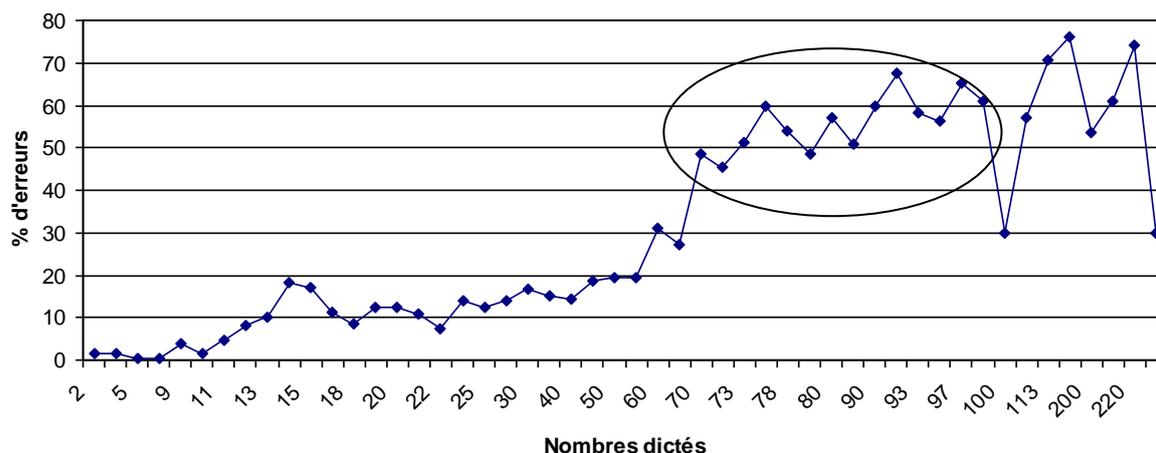


Figure 2.3.1 : Le pourcentage d'erreurs pour chaque nombre dicté

Pour les nombres à quatre chiffres, un seul nombre a été dicté ; *i.e.* « mille ». Il est remarquable qu'il y ait relativement peu d'erreurs (30%) sur mille alors que l'enseignement explicite des nombres en CP s'arrête à 99 (Figure 2.3.1). Ce faible nombre d'erreurs pourrait être expliqué par le fait que « mille » est un nombre très fréquent (Dehaene et Mehler, 1991). Afin de vérifier que le nombre d'erreurs produites par les enfants est corrélé avec la fréquence des nombres, nous avons repris les données de Dehaene et Mehler (1991), la seule étude en français qui évalue la fréquence des nombres. Nous avons trouvé les fréquences des formes arabes et les fréquences des formes verbales pour une partie de nos nombres dictés (23 et 18 nombres respectivement). La corrélation entre le nombre d'erreurs et la fréquence des formes arabes était significative $r = -.44$, $p < .05$, c'est-à-dire, plus les nombres étaient fréquents, moins les enfants produisaient d'erreurs. Par contre, cette corrélation n'était pas significative pour les fréquences des formes verbales des nombres, $r = -.25$, $p = .43$. Il semblerait donc que ce soit par l'exposition aux formes en chiffres arabes que les enfants acquièrent les habilités nécessaires au transcodage.

Les erreurs ont été classées selon les classes lexicales auxquelles appartiennent les nombres dictés (Tableau 2.3.1).

Tableau 2.3.1: Pourcentage d'erreurs total (incluant les non-réponses) sur chaque catégorie de nombre

	U	P	dix-unité	Ds	DUs	Dc	DUc	centaines	séparateurs
Erreur total	2	12	11	16	15	55	56	65	30
(Ecart –type)	(1.31)	(5.80)	(1.93)	(9.59)	(5.76)	(5.87)	(6.91)	(9.45)	(0)

Le pourcentage d'erreurs le plus élevé (65%) était sur les centaines (les produits de cent ou les nombres à 3 chiffres). L'observation du pattern de résultats montre que peu d'erreurs ont été produites sur les dizaines unités simples (DUs). Il n'y avait pas de différence significative entre pourcentage d'erreurs sur les dizaines simples (Ds : 16 %) et sur les dizaines-unités simples (15 %) $t(186) = 0.36$, $p = .72$. En accord avec ADAPT, ce faible nombre d'erreurs sur les formes dizaines-unités simples (DUs) pourrait indiquer que ces formes sont très précocement stockées en mémoire à long-terme et ne sont donc plus transcodées de façon algorithmique. Ainsi, selon ADAPT, ces formes devraient conduire à des performances similaires à celles obtenues pour des formes explicitement apprises telles que les dizaines. C'est effectivement ce que nous avons observé chez les enfants de CP. Comme pour les dizaines et les dizaines-unités simples, il n'y avait pas de différence significative entre le pourcentage d'erreurs sur les dizaines complexes (Dc) et les dizaines-unités complexes (DUc) (55%, et 56% respectivement) $t(186) = 0.69$, $p = .49$. L'enfant sait donc écrire l'ensemble des DU complexes dès qu'il peut transcoder la dizaine complexe. Par ailleurs, et vu le grand écart sur le taux d'erreurs entre les DUs et les DUc, à l'âge de 6 ans, les enfants Français ont probablement stocké en mémoire les formes arabes de DU petits et plus fréquents (15 % d'erreurs), alors qu'ils transcodent algorithmiquement les nombres complexes (Dc, DUc) spécifiques au système français. Selon Seron et Fayol (1994), ces formes complexes spécifiques au français de France seraient stockées en mémoire plus tardivement par les enfants à partir de 8 ans.

Trois analyses de variance (ANOVA), ont été effectuées sur le taux d'erreurs commis par chaque sujet (F_1), avec le nombre de règles (2, 3, et 4 règles), puis le nombre de chiffres (1, 2, et 3 chiffres), et enfin le nombre de mots (de 1 à 4 mots) comme facteur intra-sujet. Nous avons également effectué trois analyses de variance (ANOVA) sur le nombre d'erreurs commis pour chaque nombre dicté (F_2), avec aussi le nombre de règles (2, 3, et 4 règles), le nombre de chiffre (1, 2, et 3 chiffres), et le nombre de mots (de 1 à 4 mots) comme facteurs inter-sujets. Dans les analyses, les données pour « mille » et « deux cent six » ont été

éliminées, car ce sont les seuls représentants des nombres à 4 chiffres et des nombres à 5 règles respectivement.

***Relation entre le nombre de règles d'ADAPT et le nombre d'erreurs de transcodage**

Les 48 nombres dictés et analysés demandaient de 2 à 4 règles de transcodage selon ADAPT (Annexe 3). Comme le prédit ADAPT, plus un nombre avait besoin de règles pour être transcodé, plus le nombre d'erreurs était élevé, $F_1(2, 372) = 353.50$, $p < .001$, et $F_2(2, 46) = 15.90$, $p < .0001$ (Figure 2.3.2). Les résultats des enfants présentent une tendance linéaire forte sur le transcodage des nombres nécessitant 2, 3 et 4 règles $F_1(1, 186) = 414.09$, $p < .0001$. En outre, sur les nombres à 3 règles, les enfants ont produit significativement plus d'erreurs (35%) que sur les nombres à 2 règles (15%), $F_1(1, 186) = 310.65$, $p < .001$, et $F_2(1, 46) = 12.22$, $p = .001$. Encore plus d'erreurs ont été produites sur les nombres à quatre règles (60%) que sur ceux à 3 règles, $F_1(1, 186) = 237.04$, $p < .001$, et $F_2(1, 46) = 9.30$, $p < .01$.

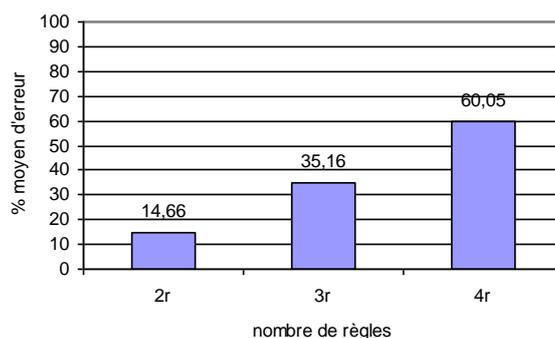


Figure 2.3.2 : Pourcentage moyen d'erreurs sur les nombres à (2, 3 et 4 règles)

***Relation entre le nombre de chiffres et le nombre d'erreurs de transcodage**

Nous avons vu précédemment, que le transcodage des nombres à 3 chiffres provoquait le taux d'erreurs le plus élevé (65%). En effet, plus un nombre contenait de chiffres, plus son transcodage était difficile, et plus les enfants produisaient des erreurs $F_1(2, 372) = 398.36$, $p < .001$, et $F_2(2, 46) = 13.03$, $p < .0001$. La performance des enfants présente une tendance linéaire forte sur le transcodage des nombres dont les formes en chiffres sont composées de 1, 2 et 3 chiffres $F(1, 186) = 522.8$, $p < .0001$. Sur les nombres à 2 chiffres les enfants ont produit plus d'erreurs (30%) que sur les nombres à 1 chiffre (2%) $F_1(1, 186) = 254.90$, $p < .001$, et $F_2(1, 46) = 8.88$, $p < .01$. Également, le transcodage des nombres à 3 chiffres a

provoqué plus d'erreurs que celui des nombres à 2 chiffres, $F_1(1, 186) = 284.46$, $p < .001$, et $F_2(1, 46) = 13.66$, $p < .001$ (Figure 2.3.3).

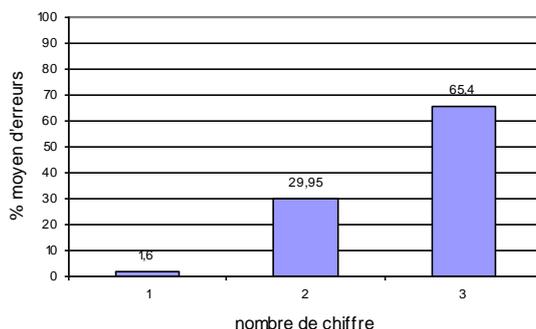


Figure 2.3.3 : Pourcentage moyen d'erreurs selon les nombres de chiffres (1,2 et 3)

Analyse structurale

Une observation plus précise du taux d'erreurs sur les nombres à 2 chiffres (37 nombres) montre une différence significative entre le taux d'erreurs sur les nombres qui sont inférieurs à 70 (14%), et ceux supérieurs à 70 (56%), c'est à dire les dizaines et les dizaines unités complexes $F_1(1, 186) = 293.52$, $p < .0001$, $F_2(1, 35) = 353.34$, $p < .0001$ (Figure 2.3.4).

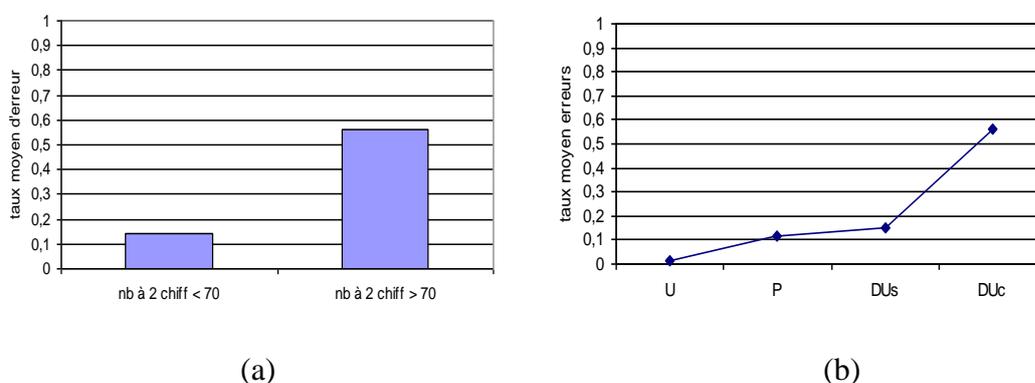


Figure 2.3.4 : (a) Taux moyen d'erreurs pour les nombres à deux chiffres (<70 et >70)
(b) Taux moyen d'erreurs pour les unités, particuliers, dizaines-unité simples et complexes

Le transcodage des dizaines et des dizaines-unité complexes s'avérait difficile, parce que, à ce stade de développement, les règles nécessaires pour transcoder ces nombres n'étaient pas encore acquises. Les enfants ne disposeraient pas non plus en mémoire de connaissances correspondantes aux formes digitales de ces nombres. En outre, en analysant les nombres inférieurs à 70 (U, P, dix-unité, Ds, et DUs), nous avons observé une augmentation du

nombre d'erreurs avec l'augmentation de la taille du nombre (sa magnitude) $r = .88$, $p < .0001$. De plus, et puisque dans la langue française les nombres de 1 à 16 sont composés d'une seule primitive lexicale ils seraient donc à apprendre par cœur. Par contre, l'enfant pourrait construire les nombres de 17 jusqu'à 69 qui sont composés de deux primitives lexicales.

Ainsi, en prenant les nombres de 2 à 15, et puis de 17 à 68, nous avons trouvé aussi une corrélation significative entre la taille du nombre et le nombre d'erreurs de transcodage $r = .82$, $p < .0001$ et $r = .91$, $p < .0001$ respectivement. Cette corrélation est tendanciellement significative pour les nombres de 70 à 98, $p = .056$, sachant que le nombre de chiffres et la taille du nombre sont corrélés $r = .72$, $p < .0001$.

Le nombre d'erreurs n'augmentait pas seulement à l'intérieur de chaque catégorie de nombre inférieurs à 70 (U, P, DUs et DUc) avec leur magnitude (Figure 2.3.5), mais aussi pour chaque catégorie par rapport à l'autre et par rapport aux (DUc) dans l'ordre de leur apprentissage au cours du développement $F_1(3, 558) = 223.99$, $p < .001$ (Figure 2.3.4). Les erreurs produites sur les particuliers étaient significativement plus élevées que celles produites sur les unités $F_1(1, 186) = 45.58$, $p < .0001$. De même le taux d'erreurs sur les DUs était significativement plus élevé par rapport à celui sur les Particuliers $F_1(1, 186) = 5.21$, $p < .05$. Enfin, le taux d'erreurs était encore plus élevé sur les DUc par rapport à celui sur les DUs $F_1(1, 186) = 242.68$, $p < .001$.

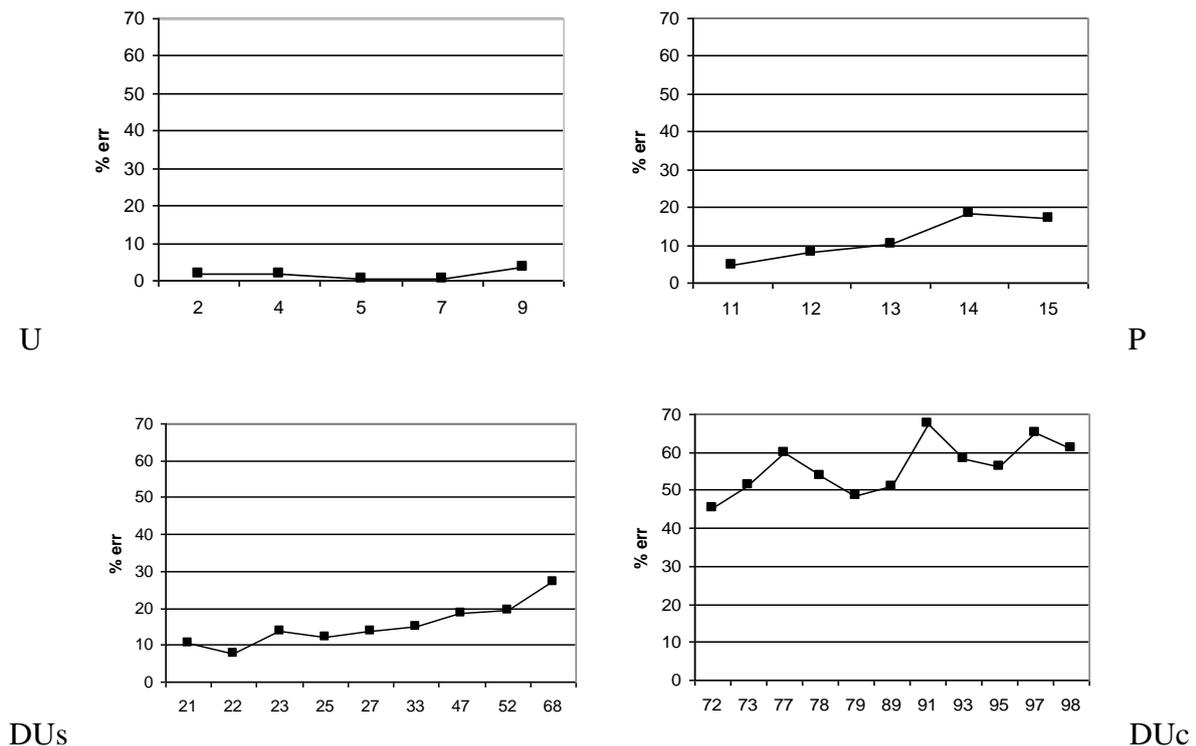


Figure 2.3.5: Pourcentage d'erreurs sur les unités (U), les Particuliers (P), les Dizaines-Unités Simples (DUs) et les Dizaines-Unités Complexes (DUC)

***Relation entre le nombre d'unités verbales (le nombre de mots¹⁶) et le nombre d'erreurs de transcodage**

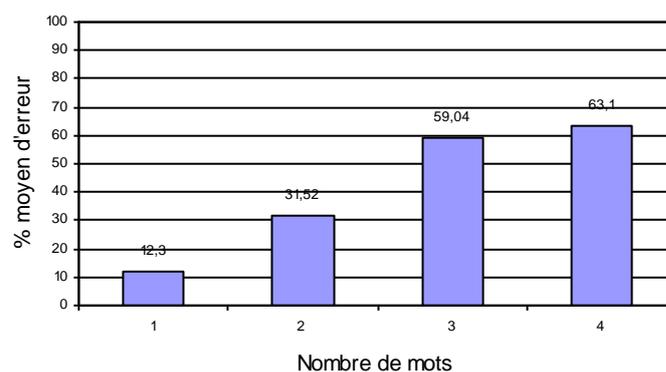


Figure 2.3.6 : Pourcentage moyen d'erreurs selon le nombre de mots (de 1 à 4)

¹⁶ Nous l'avons évalué également en nombre de syllabes (les nombres dictés ont de 1 à 5 syllabes). Les résultats ont montré aussi que plus un nombre contenait de syllabes dans sa forme verbale, plus les enfants produisaient des erreurs de transcodage $F_1(4, 744) = 233,24, p < .0001$ et présentent une tendance linéaire forte $F_1(1, 186) = 303,42, p < .0001$.

La mémoire constitue une structure nécessaire à la mise en œuvre correcte du système de transcodage dans ADAPT. La capacité limitée de la mémoire pourrait être un facteur contraignant le transcodage. Ainsi, le nombre de mots composant un nombre aurait un impact sur le nombre d'erreurs produites.

Comme prédit, plus un nombre contenait de mots, plus les enfants produisaient des erreurs de transcodage (12%, 32%, 59%, 63% pour 1, 2, 3, et 4 mots respectivement) $F_1(3, 558) = 271.97, p < .001$, et $F_2(3, 46) = 19.89, p < .0001$ (Figure 2.3.6). Les résultats présentent une tendance linéaire forte sur le transcodage de ces nombres $F_1(1, 186) = 318.56, p < .0001$. Pour les nombres à 2 mots, il y avait plus d'erreurs que pour les nombres à un seul mot $F_1(1, 186) = 254.05, p < .001$, et $F_2(1, 46) = 12.88, p < .001$. De même, les erreurs produites sur les nombres à 3 mots étaient plus nombreuses que sur les nombres à 2 mots $F_1(1, 186) = 288.13, p < .05$, et $F_2(1, 46) = 18.57, p < .0001$. Plus d'erreurs ont été produites sur les nombres à 4 mots que sur les nombres à 3 mots, $F_1(1, 186) = 9.19, p < .01$ et $F_2 < 1$. Cette absence de différence sur le F_2 pourrait résulter du fait qu'il n'y avait que deux nombres à 4 mots parmi les 48 dictés et analysés « quatre vingt dix sept » et « quatre vingt dix huit ».

Nous avons donc observé un effet significatif pour chacun des prédicteurs possibles des erreurs produites par les enfants. Une analyse de régression multiple pas à pas a été effectuée pour savoir quel est le meilleur prédicteur du nombre d'erreurs parmi le nombre de règles, le nombre de chiffres, la taille du nombre, et le nombre de mots. Cette analyse a montré que le meilleur prédicteur du taux d'erreurs était la taille du nombre, $r = .87, p < .0001$. Cette variable expliquait 75% de la variance observée ($R^2 = .753$). La seconde variable expliquant significativement la variance observée était le nombre de mots (R^2 change = .08). Prises conjointement, la taille du nombre et le nombre de mots expliquaient 83% de la variance observée. Aucune autre variable n'expliquait la variance observée.

Analyse qualitative des erreurs de transcodage :

Pour compléter cette analyse quantitative, nous avons effectué une analyse qualitative des erreurs produites par les enfants. Seules les erreurs produites au moins deux fois, à l'intérieur d'une catégorie de nombres, ont été classées (*i.e.*, ce ne sont pas les erreurs produites 2 fois sur le même nombre mais dans la même catégorie qui ont été classées, afin de conserver un nombre d'erreurs analysées conséquent). Ainsi, nous avons pu classer 1907 erreurs (65% des erreurs totales et 76 % des erreurs pures sans les non-réponses) (Tableau 2.3.2).

Tableau 2.3.2: Pourcentage d'erreurs total, et répartitions de ces erreurs en erreurs analysées, non-analysées et non réponses dans chaque catégorie de nombre

%	U	P	dix-unité	Ds	DUs	Dc	DUc	centaines	sépérateurs
Erreur total	2	12	11	16	15	55	56	65	30
Non réponse	40	13	10	11	14	15	15	11	22
Erreurs analysées	27	64	65	65	56	66	63	73	55
Erreurs non analysés	33	23	25	24	30	19	22	16	23

Nous distinguons les erreurs lexicales des erreurs syntaxiques (Deloche & Seron, 1982 ; Caramazza & McCloskey, 1987). On parle d'erreurs lexicales lorsque l'erreur concerne le remplacement par d'autres chiffres de un ou plus des chiffres corrects, en produisant un nombre dont la taille (c'est-à-dire le nombre de chiffres) est correcte. Sur l'ensemble des erreurs lexicales, nous distinguons 3 types d'erreurs. (1) l'erreur de pile : l'erreur produite appartient à une autre catégorie lexicale, mais les positions de la cible et de l'erreur sont identiques dans leur catégorie respective, par exemple (« quatorze » écrit 40). En ce qui concerne les DU nous avons considéré les groupes de 21 à 29, de 31 à 39, etc. comme des piles distinctes. Ainsi, écrire 22 pour 32 constituait une erreur de pile. (2) la substitution de chiffres, par exemple « quarante » écrit 41, qui contient aussi le cas des erreurs de position, c'est-à-dire que la classe lexicale est maintenue mais la position au sein de la classe est erronée (13 → 12). Cette dissociation (classe lexicale bonne mais la position dans la classe erronée ou l'inverse), s'explique par le fait qu'il existerait des mécanismes différents pour gérer l'accès à une position et à une classe lexicale. Cet accès pourrait se faire sur la base d'informations morphologiques (*e.g.*, dans « quarante », le « ante » renverrait à la dizaine; le « qua » à la quatrième position). (3) l'inversion de Dizaine Unité D/U « douze » écrit « 21 », qui correspondrait à une faible maîtrise de la notation positionnelle.

On parle d'erreurs syntaxiques lorsque la structure syntaxique est violée alors que la classe lexicale est respectée. Par exemple, le transcodage de « dix sept » par « 18 » constitue une erreur lexicale tandis que cette même séquence transcodée « 107 » constitue une erreur syntaxique. Nous distinguons 4 grandes catégories d'erreurs syntaxiques : une concernant le traitement de zéros (ajouter un, deux, ou trois zéros), la deuxième concerne la suppression d'un zéro ou d'un chiffre (écrire 9 pour quatre-vingt-dix-sept), la troisième catégorie concerne le transcodage littéral partiel ou complet, et la dernière concerne l'insertion de « 1 » entre les Dizaines et les Unités. D'autres erreurs (123 erreurs) qui ne correspondent pas à aucune de ces deux catégories d'erreurs ont été considérées comme « inclassables ».

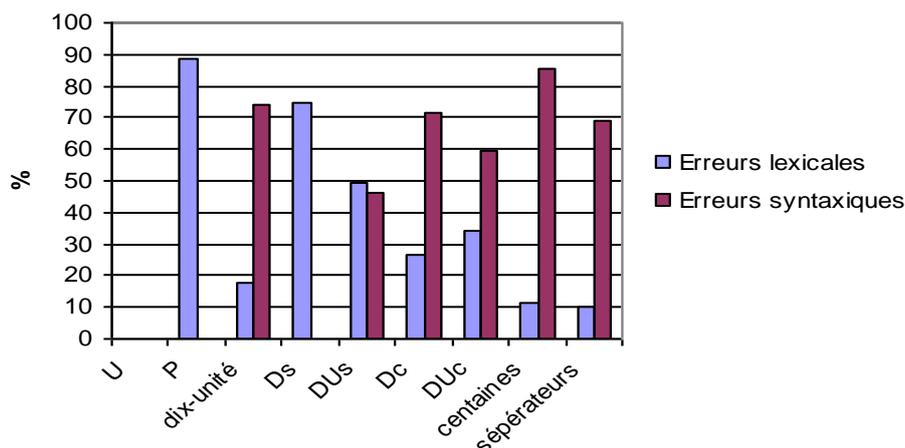


Figure 2.3.7: Pourcentage d'erreur lexicale et syntaxique dans chaque catégorie de nombres (sur le total d'erreurs analysées par catégorie)

Les enfants ont produit plus d'erreurs syntaxiques que d'erreurs lexicales (1260 et 524 erreurs, donc 66% et 28% des erreurs classées respectivement) (Figure 2.3.7). L'erreur principale était le transcodage littéral partiel 587 erreurs (31 % des erreurs totales analysées), par exemple écrire 410 pour « quatre-vingt-dix ». De plus, 483 erreurs (25% des erreurs totales analysées) correspondaient à un transcodage littéral complet, par exemple écrire « 420 » pour « quatre-vingt ». Le transcodage littéral partiel était le plus fréquemment produit sur les Dc (19 %) et les DUc (18 %) comme écrire 415 pour « quatre-vingt-quinze ». Par contre, le transcodage littéral complet était plus fréquemment produit sur les centaines (23 %), comme écrire 10013 pour « cent treize » (Tableau 2.3.3).

Très peu d'erreurs ont été produites sur les unités (2%), et elles étaient toutes inclassables. Par exemple, un enfant écrivait « 21 » deux fois pour les nombres « deux » et « sept », ou écrire « 39 » deux fois pour le nombre « neuf ». Ainsi, on peut dire qu'à cet âge, les enfants ont stocké en mémoire les unités (U) qui présentent les nombres de base du système numérique décimal.

Tableau 2.3.3: Pourcentage de différents types d'erreurs observés sur chaque catégorie lexicale de nombres par rapport au nombre de forme dicté dans chaque catégorie et le nombre de sujets

	Type d'erreur	U	P	Dix-unité	Ds	DUs	Dc	DUc	centaines	séparateurs
		n = 5	n = 5	n = 3	n = 6	n = 9	n = 3	n = 11	n = 6	n = 2
Lexicale	pile	0	3	1	2	4	0	7	3	0
	substitution	0	2	0	5	0,4	8	2	0,6	2
	inversion D/U	0	2	0	0,4	0,1	0,9	0	2	0
Syntaxique	+ un 0	0	0	0	0	0	0	0	3	9
	+ deux 0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
	+ trois 0	0	0	0	0	0,4	0	0	2	0
	- un 0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
	suppression un chiffre > 0	0	0	0	0	0,2	0	0,2	0	0
	transcodage littéral complet	0	0	5	0	3	7	5	23	0
	transcodage littéral partiel	0	0	0	0	0,4	19	18	9	0
	D 1 U	0	0	0	0	0,1	0,5	1	0	0

n: nombre de nombres dictés dans une catégorie

Sur les particuliers, les erreurs étaient exclusivement lexicales (89 %), correspondant essentiellement à des erreurs de pile (41 %), Par exemple « quatorze » écrit 40. Cette erreur était l'erreur la plus souvent commise (11 occurrences) sur les particuliers. De plus, 27% des erreurs correspondaient à la substitution de chiffres (ex: « treize » → « 17 »), et 20% à l'inversion de dizaine/ unité (ex: « douze » → « 21 ») (Figure 2.3.8). De même, sur les dizaines simples, l'erreur la plus fréquente (8 occurrences) était d'écrire 13 au lieu de « trente ».

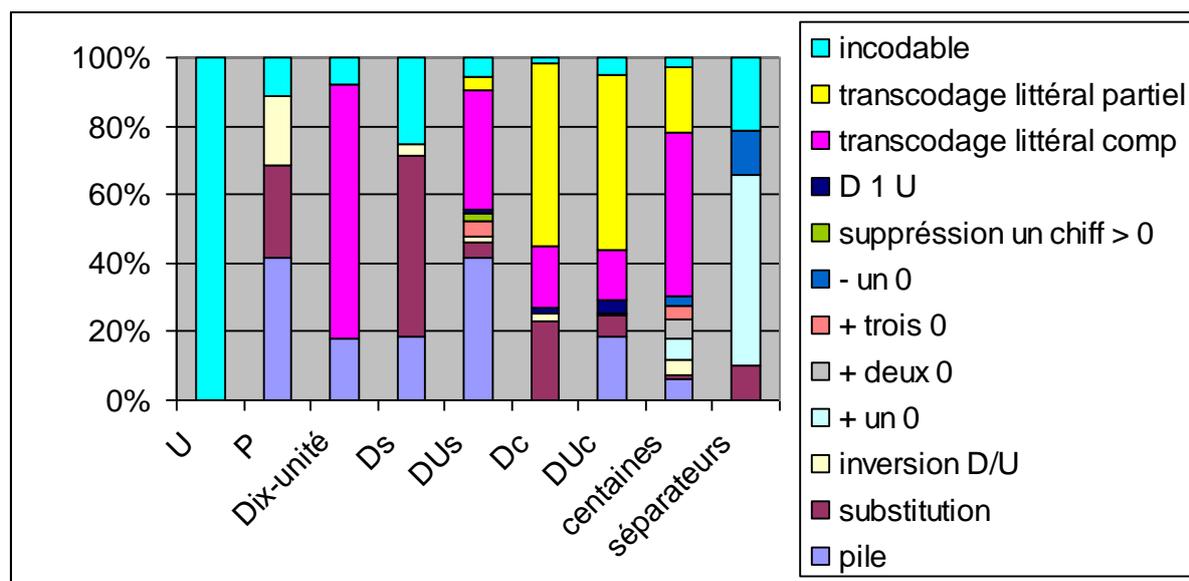


Figure 2.3.8: Répartition des différents types d'erreurs selon les différentes catégories lexicales de nombre

Contrairement aux deux catégories précédentes de nombres, les erreurs produites sur les Dix-unités étaient plutôt des erreurs syntaxiques (74 %) que des erreurs lexicales (18 %, Figure 2.3.7). Ces erreurs syntaxiques correspondaient à ce que nous avons appelé un transcodage littéral complet où le mécanisme syntaxique d'intégration des divers éléments du nombre en un tout ne fonctionne pas. Chaque élément de la suite dictée est transcrit comme un nombre isolé (par exemple : écrire 107 au lieu de dix-sept). Cette stratégie de transcodage algorithmique est utilisée lorsque la récupération de la forme en chiffres correspondant a échoué. Cette récupération ne s'est pas faite, soit parce que la forme en chiffres n'est pas stockée en mémoire à long terme, soit parce que l'association entre la forme verbale et la forme en chiffres n'est pas suffisamment forte. Ainsi, la chaîne verbale a été découpée en unités qui sont traitées de façon distincte par le système de production.

Quant aux DUs (les dizaines-unités inférieures à 70), les enfants ont quasiment produit autant d'erreurs lexicales (50 %) que syntaxiques (46%) (Figure 2.3.7). Les erreurs lexicales correspondaient essentiellement à des erreurs de pile (41%), par exemple écrire 17 pour « vingt sept ». Cette erreur était l'erreur principale parmi les erreurs lexicales sur cette catégorie de nombres (7 occurrences). Quant aux erreurs syntaxiques, elles correspondaient essentiellement au transcodage littéral complet (34%), par exemple, écrire « 502 » pour

« cinquante deux ». Cette erreur était l'erreur principale parmi les erreurs syntaxiques produites sur cette catégorie de nombres (12 occurrences).

En ce qui concerne les dizaines complexes (Dc), la majorité des erreurs produites étaient syntaxiques (71 % Figure 2.3.7). La plupart (53 % des erreurs analysées dans cette catégorie) indiquaient un transcodage littéral partiel de ces dizaines complexes (Figure 2.3.8). En outre, sur l'ensemble des erreurs, on observe le plus fréquemment la réponse « 420 » pour « quatre-vingt » (17 occurrences) ce qui correspondait à un transcodage littéral complet, tandis que les erreurs lexicales étaient moins nombreuses (27%, Figure 2.3.7) et correspondaient en majorité à la substitution de chiffres (23 %, Figure 2.3.8), par exemple écrire « 40 » pour « quatre-vingt », qui était l'erreur principale avec 11 occurrences.

Egalement pour les dizaines-unités complexes (DUc), les erreurs produites par les enfants étaient en majorité syntaxiques (59 %, Figure 2.3.7) et correspondaient essentiellement à un transcodage littéral partiel des nombres (51%, Figure 2.3.8). Par exemple, l'erreur la plus fréquente était d'écrire « 612 » pour « soixante douze » (19 occurrences). Quant aux erreurs lexicales, elles correspondaient en majorité à des erreurs de pile (19 %, Figure 2.3.8), par exemple écrire « 67 » pour « soixante-dix-sept ». Cette dernière erreur était l'erreur la plus fréquente sur l'ensemble des erreurs produites dans cette catégorie de nombre (18 occurrences).

Concernant les centaines, les erreurs syntaxiques étaient beaucoup plus nombreuses que les erreurs lexicales (85 % et 12 % respectivement, Figure 2.3.7). La majorité des erreurs syntaxiques correspondaient à des transcodages littéraux complets (48 %, Figure 2.3.8), par exemple écrire « 2100 » pour « deux cent » (34 occurrences), ou « 1003 » pour « cent trois ». Cette dernière erreur était l'erreur la plus fréquente (57 occurrences). Les autres erreurs étaient de sept types différents (Figure 2.3.8).

Lorsque la chaîne à traiter ne correspond pas à une unité représentationnelle stockée en mémoire, le parsing recherche les séparateurs déclencheurs de règles de façon hiérarchique et segmente la chaîne autour de ces séparateurs. Ainsi, lorsque la règle de production pour « cent » n'est pas disponible, le parsing identifie « cent » comme unité représentationnelle, et récupère sa forme en chiffres en mémoire (100). Ainsi, « cent trois » transcodé « 1003 », menant à un transcodage littéral complet. Cette connaissance déclarative de la forme digitale de « cent » pourrait provoquer une règle primitive de « cent » qui ajoute deux zéros au

multiplie au lieu d'ajouter deux cases vides dans la chaîne de chiffres en construction. Ce qui provoquerait les erreurs de type « deux cent six » transcodé « 2006 ».

En ce qui concerne les séparateurs « cent » et « mille », les enfants ont produit autant d'erreurs sur l'un que sur l'autre (un total de 56 erreurs incluant les non-réponses pour chacun des deux séparateurs). Les erreurs étaient en majorité syntaxiques (69 %, Figure 2.3.7) et consistaient à produire un zéro en plus (56 %, Figure 2.3.8), par exemple l'erreur la plus fréquente était d'écrire « 1000 » pour « cent » (22 occurrences). Un deuxième type d'erreur qui était moins fréquente et qui ne se produisait que sur « mille » était de supprimer un zéro (8 occurrences = 13 % Figure 2.3.8). Ces deux types d'erreurs résultaient d'une confusion de formes mémorisées car les enfants ne connaissent pas les règles de transcodage pour « cent » et « mille ». Peu d'erreurs lexicales ont été produites (10 %, Figure 2.3.7), et elles correspondaient toutes (10 % par rapport aux erreurs analysées dans cette catégorie, Figure 2.3.8) à la substitution de chiffre, Par exemple, écrire « 200 » pour « cent » (2 occurrences), ou « 3000 » pour « mille » (2 occurrences).

Discussion

Les études antérieures du transcodage des nombres ont donné une première description des erreurs produites par les enfants à partir de l'âge de 7 ans, en catégorisant ces erreurs comme lexicales et syntaxiques. Cependant, ces études sont plutôt limitées par le faible nombre d'enfants impliqués et les nombres dictés, sauf l'étude de Seron *et al* (1991) qui incluait 30 enfants par âge et 72 nombres dictés.

L'étude actuelle avait pour objectif d'étudier les processus de transcodage numérique de la forme verbale du nombre dans sa forme en chiffres. Elle est la première à évaluer ces processus chez des jeunes enfants de 6 ans en début d'apprentissage scolaire, et à utiliser le nouveau modèle de transcodage numérique (ADAPT) comme cadre théorique. Ce modèle est un modèle procédural qui décrit le transcodage des nombres comme un processus à plusieurs étapes dépendant de règles de production. Dans ADAPT, le transcodage des nombres a été décrit précisément. Chaque nombre dans sa forme verbale exige une séquence de règles qui permet son transcodage dans sa forme en chiffres (Annexe 3). Comme nous l'avons prédit, nous avons observé un effet significatif du nombre de règles que le nombre exige pour être

transcodé sur le nombre d'erreurs produites par les enfants. Une grosse différence de performance des enfants a été observée lorsque nous avons comparé les formes de Dizaines-unités complexes (DUc) avec les formes des unités (U), particuliers (P), et les dizaines-unités simples (DUs) (Figure 4). Le nombre d'erreurs produites sur les dizaines (Dc) et les dizaines-unités complexes (DUc) était significativement plus élevé que celui sur les autres catégories inférieures à 70 (P, Dix-unité, Ds, et DUs) (Figure 2.3.4). Ainsi, compte tenu de leur fréquence et la précocité de leur apprentissage, ces formes numériques simples, c'est-à-dire les particuliers, les dizaines et les dizaines-unité simples, ont été probablement traitées comme des unités par le processus de parsing et ont été associées directement à leur forme en chiffre en mémoire à long terme. Ainsi, leur transcodage a exigé simplement l'application d'une seule règle de récupération de leur forme en chiffres en mémoire à long-terme au lieu de l'application de plusieurs règles lorsque la forme correspondant en chiffres n'est pas disponible en mémoire. Ceci explique le faible pourcentage d'erreurs syntaxiques produites sur ces formes numériques simples par rapport aux formes plus complexes (Dc et DUc). Sur les dizaines et les dizaines-unités complexes (Dc, DUc) un transcodage algorithmique (application de règles) était exigé pour traiter ces formes complexes et conduisait à produire beaucoup d'erreurs syntaxiques. Ce transcodage algorithmique est utilisé lorsque la récupération en mémoire des formes correspondantes en chiffres a échoué. Cet échec venait probablement du fait que les enfants n'ont pas encore appris ces formes numériques complexes et associé les formes verbales des nombres avec les formes correspondantes en chiffres. Ainsi, lorsque la chaîne numérique verbale n'a pas pu être traitée globalement, son transcodage nécessitait le parsing qui la découpait en unités susceptibles d'être traitées ensuite par le système de production. Comme le montre le pattern de résultats, les dizaines (Dc) et les dizaines-unités complexes (DUc) n'ont pas été traités comme des primitives lexicales intégrées. Plus précisément, la majorité d'erreurs produites par les enfants sur ces structures numériques complexes indique un transcodage littéral partiel, correspondant à un transcodage successif de chacune des primitives lexicales composant les formes verbales de ces dizaines complexes mais qui ne conduit pas à transcoder complètement la chaîne (par exemple écrire « 411 » pour « quatre-vingt-onze »). Ce transcodage littéral partiel est probablement dû à la longueur de la chaîne verbale (ex: « quatre-vingt-dix-sept »), qui entraîne un coût élevé pour stocker et traiter les informations. Pour les autres structures numériques (dix-unité, DUs, et les centaines) dont les chaînes numériques verbales sont plus courtes, les erreurs syntaxiques correspondaient plus au transcodage littéral complet qu'au transcodage littéral partiel (DUs et

les centaines) (ex: écrire « 502 » pour « cinquante-deux »), et totalement au transcodage littéral complet pour les dix-unités.

Le rôle de la longueur des chaînes numériques verbales est confirmé par l'effet important du nombre de mots sur le nombre d'erreurs de transcodage. Plus un nombre comprenait de mots dans sa forme verbale, plus son transcodage en chiffres entraînait d'erreurs. ADAPT est le seul modèle de transcodage numérique qui met en interaction la mémoire à long terme (MLT), la mémoire de travail (MdT), un système de production et un système de « parsing » chargé de découper la chaîne verbale entendue. Nous avons vu que les enfants ont produit essentiellement des erreurs du genre « transcodage littéral partiel ». De plus, ces erreurs étaient essentiellement produites sur les dizaines-unités complexes où la chaîne numérique verbale est longue (ex: quatre-vingt-dix sept). Ainsi, les erreurs pourraient venir d'un coût élevé pour maintenir l'information phonologique, pour récupérer des connaissances en MLT, mettre en œuvre des règles de production et enfin maintenir les résultats intermédiaires en MdT, et cela pour chaque portion de la chaîne verbale, ce qui entraînerait à la fin un coût cognitif très élevé pour l'ensemble des éléments. Ainsi, on peut imaginer que plus cette chaîne verbale est longue plus son traitement est coûteux. Seron et Fayol (1994), reprenant le modèle de McCloskey, n'ont pas distingué les « transcodages littéraux complets » des « transcodages littéraux partiels ». Ils expliquent ces deux types d'erreurs par une généralisation des règles inférées du transcodage des formes principales antérieures. Par exemple, un enfant qui a maîtrisé les structures Cent-dizaine, a utilisé une règle « ajouter un zéro » à la fin droite de chaque structure contenant « Cent ». Ainsi, dès qu'il sait par exemple écrire « cent-vingt » → « 120 », il utilise la même règle pour transcoder « cent-vingt-quatre » en « 1240 ».

En outre, nous avons supposé que le nombre de chiffres composant un nombre, aurait un effet sur la difficulté de transcodage. Effectivement, le pattern de résultats a montré un effet significatif du nombre de chiffres. Plus un nombre comprenait de chiffres, plus son transcodage était difficile et plus le nombre d'erreurs était élevé. L'apprentissage des dix premiers chiffres dans le système numérique arabe (0 à 9) ne semble pas poser problème, mais la difficulté augmente avec le passage des nombres à un chiffre aux nombres à deux puis à trois etc., car ce passage nécessite la mise en œuvre d'une nouvelle connaissance : la valeur positionnelle des chiffres (la place qu'ils occupent dans le nombre) donc l'acquisition des règles qui contrôlent la notation. Le nombre de chiffres est corrélé aussi avec la taille du nombre (sa magnitude) : 21 et 68 ont le même nombre de chiffre mais 68 est plus grand que

21. Ainsi, nous avons vu que le nombre d'erreurs produites sur les nombres à deux chiffres inférieurs à 70 augmentait avec leur taille ou magnitude. Plus le nombre était grand, plus son transcodage était difficile, et plus le nombre d'erreurs était élevé. Le nombre d'erreurs n'augmentait pas seulement à l'intérieur de chaque catégorie de nombre (U, P, DUs) avec leur magnitude, mais aussi pour chaque catégorie par rapport à l'autre. Ainsi il y avait un effet de la taille du nombre qui est probablement dû à l'ordre d'apprentissage des nombres qui s'effectue de plus petit vers le plus grand, mais aussi un effet de la structure numérique, c'est-à-dire que l'enfant apprendrait les nombres en les organisant dans des catégories lexicales.

Par ailleurs, nous avons supposé, selon ADAPT, que le transcodage des dizaines-unités (DUs, DUc) ne serait pas plus difficile que celui des dizaines (Ds, Dc). Effectivement, leur transcodage conduisait au même taux d'erreurs. Par contre, les modèles antérieurs prédisent que le transcodage des formes DU devrait être plus difficile que celui des dizaines (D), de particuliers et des unités. Par exemple, dans les deux modèles proposés par Power et Dal Martello (1990, 1997), les auteurs ont postulé que le transcodage des formes DU exige une règle de sur-écriture (*overwriting*) pour remplacer le zéro de dizaine par l'unité. De la même façon, Deloche and Seron (1987) ont supposé que le traitement des DU exige deux étapes distinctes; une pour la décade et l'autre pour l'unité. Les auteurs du modèle ADAPT ont testé ces prédictions et n'ont trouvé aucun effet lorsque les dizaines et les dizaines-unités étaient comparées. De même, dans notre étude, et comme ADAPT le prédit, le transcodage des dizaines (Ds, Dc) et des dizaines-unités (DUs, DUc) entraînait le même taux d'erreurs. Ainsi, les formes DU ne sont pas plus difficiles que les formes D, et dès que l'enfant sait écrire les D il sait écrire les DU.

Conclusion

La présente étude avait pour but d'explorer le transcodage des nombres de leur forme verbale dans leur forme en chiffres arabes chez les enfants en début d'apprentissage scolaire. Les enfants de CP ont réussi à produire 69% de bonnes réponses. L'apprentissage des nombres s'effectue par ordre croissant de taille du plus petit vers le plus grand. Les enfants étaient capables de produire correctement les nombres de base de 0 à 9, et commettaient également peu d'erreurs sur les formes numériques simples (les Particuliers et les Dizaines simples) comprenant une seule primitive lexicale. En revanche, ils ont rencontré des difficultés avec les

structures complexes qui comprennent des associations de plusieurs primitives lexicales et des relations de somme et de produit comme les Dc et les DUc. Les erreurs produites par les enfants sont en majorité de nature syntaxique, et révèlent des difficultés dans le traitement des dizaines et des dizaines-unités complexes. Les irrégularités du système de dénomination verbal français des quantités, notamment pour les dizaines et les dizaines unités complexes, seraient à l'origine de la faiblesse de ces performances. Dès qu'un nombre comprend plus d'une primitive, les erreurs syntaxiques commencent à apparaître, même sur les formes simples comme les dix-unité et les DUs, au moins chez les sujets qui n'ont pas automatisé le transcodage de ces formes en récupérant directement en mémoire les formes correspondantes en chiffres (Figure 6). Pourtant, ces erreurs restent peu nombreuses par rapport à celles produites sur les formes complexes et les centaines. Nous avons vu aussi que lorsque l'enfant sait écrire une Dizaine, il sait écrire les Dizaines-unités qui suivent.

Quant à « cent » et « mille », vu leur forte fréquence dans la vie quotidienne, ces formes numériques ne conduisent qu'à peu d'erreurs par rapport aux autres formes précédentes bien que l'enseignement systématique des nombres en CP s'arrête à 99. Comme nous l'avons vu précédemment, il y avait une corrélation significative entre le nombre d'erreurs et la fréquence des formes arabes; plus les nombres étaient fréquents, moins les enfants produisaient d'erreurs. Il est donc probable que ce serait par l'exposition aux formes en chiffres arabes que les enfants acquièrent les habilités nécessaires au transcodage.

Cette étude nous a permis d'observer des stratégies inventées par les enfants lorsqu'ils étaient confrontés à des formes complexes et d'autres qui n'étaient pas encore appris. Les résultats obtenus nous conduisent à penser que l'origine des erreurs pourrait se trouver aussi bien au niveau de la mémoire de travail qu'au niveau du système de production. Ainsi, une étude longitudinale est nécessaire pour vérifier plus précisément l'évolution du transcodage au cours du développement, et la transition des processus algorithmiques aux processus de récupération en mémoire au cours de l'apprentissage. Ceci fera l'objet de l'étude suivante.

2.4. Étude de l'évolution des connaissances de transcodage des nombres chez des enfants français de Grande section maternelle (GS) et de Cours Préparatoire (CP)

« Approche longitudinale »

Introduction:

Les modèles de transcodage disponibles avant ADAPT (McCloskey, *et al.*, 1985 ; Deloche & Seron 1987 ; Power & Dal Martello 1990) se sont limités à décrire le fonctionnement expert. En ce sens ils ne permettaient pas d'expliquer les aspects développementaux. Par contre, ADAPT est le premier modèle développemental du transcodage numérique de la forme verbale en chiffres arabes. Comme nous l'avons déjà vu, les auteurs d'ADAPT se sont intéressés aux capacités d'apprentissage chez l'enfant et ont construit trois versions du modèle qui correspondent aux différents états de son développement. ADAPT_{BASIC} pour les premières étapes de l'apprentissage et l'écriture des petits nombres (jusqu'à 99), ADAPT_{ADV} qui correspond à l'état du système lorsque les formes les plus simples ont été mémorisées, et enfin ADAPT_{LD} qui représente un état intermédiaire, pour lequel les formes DU ne sont pas disponibles en MLT, et donnent donc toujours lieu à un transcodage algorithmique nécessitant plusieurs règles.

En cette qualité, ADAPT permet de rendre compte du développement de l'activité de transcodage par deux processus principaux qui en sont responsables : la création de nouvelles procédures et l'accroissement du lexique en mémoire à long-terme. Concernant la création de procédures, et conformément au modèle ACT-R d'Anderson (1993), ADAPT suppose que toute connaissance commence sous forme déclarative pour se transformer plus tard en procédure par un processus de compilation qui se base sur des analogies (*cf. supra*).

Par ailleurs, pour ADAPT, le lexique évolue avec le fonctionnement même du système, c'est-à-dire que le nombre d'unités représentationnelles stockées en mémoire à long-terme augmente. Cette évolution du lexique augmente l'efficacité du transcodage, car certaines formes comme les « Dizaines-unités » donnent lieu à un apprentissage rapide et leur

transcription ne nécessite plus un transcodage algorithmique mais une récupération directe en mémoire de la forme en chiffres correspondante. Ainsi, les erreurs vont diminuer puisque dans chaque mise en œuvre des procédures du transcodage algorithmique la production d'une erreur reste probable.

Ce modèle permet donc de comprendre l'évolution du système procédural c'est à dire l'acquisition de nouvelles règles de transcodage à partir des règles déjà connues ainsi que le stockage de nouvelles connaissances en mémoire suite à chaque transcodage, lesquelles vont diriger à leur tour les transcodages ultérieurs. Rappelons que pour valider ADAPT_{LD} et ADAPT_{ADV}, Barrouillet et son équipe (2004) avaient réalisé une étude développementale sur un échantillon composé de 410 enfants français âgés de 8 et 9 ans et poursuivant leur scolarité en CE1 et CE2 auxquels 92 nombres (entre 40 et 9704) ont été dictés. Parmi ces nombres, 12 étaient à 2 chiffres donc inférieurs à 100 alors que 27 étaient à 3 chiffres et 53 à 4 chiffres. Les règles d'ADAPT_{LD} et ADAPT_{ADV} ont été appliquées sur les nombres dictés. Les résultats de cette étude confirmaient que le nombre de règles utilisées par les enfants pour transcoder les nombres dictés était corrélé positivement avec le taux d'erreurs produites. Par ailleurs, ces erreurs étaient en grande majorité de nature syntaxique, et correspondaient principalement au transcodage littéral chez les enfants de deuxième année d'école primaire.

Notre étude s'inscrit dans le prolongement de cette étude développementale mais vise à tester la version ADAPT_{BASIC} et montrer donc comment se met en place le transcodage des nombres jusqu'à 99 chez des enfants plus jeunes, âgés de 5 à 7 ans, scolarisés en grande section de maternelle (GS) et en cours préparatoire (CP). Le choix des enfants de GS se justifie par le fait qu'ils n'ont pas encore reçu un enseignement systématique des nombres et qu'ils n'ont donc pas nécessairement appris les nombres de 1 à 99 alors que les enfants de CP sont au début de leur apprentissage scolaire des nombres programmés de 1 à 99 et sont en train d'acquérir les règles de transcodage.

Présentation d'ADAPT_{BASIC} :

Le modèle ADAPT_{BASIC} écrit les nombres jusqu'à 99. Il est basé sur l'assignation de chaque primitive lexicale à sa catégorie (classe lexicale). Les connaissances en MLT associent les primitives lexicales avec leurs positions dans la classe lexicale (Deloche et Seron, 1987). Ainsi, « quatorze » est associé avec la quatrième position des nombres particuliers, et

« trente » est associé avec la troisième position des dizaines. Cette valeur positionnelle (PV dans le modèle) serait récupérée en MLT et placée par les procédures dans la séquence de chiffres (chaîne numérique dans le modèle) en cours de construction en MDT. Les procédures d'ADAPT_{BASIC} (de Pa à Pe' Tableau 2.4.1) sont déclenchées par deux types de conditions : la nature de l'entrée lexicale (primitive lexicale) et la présence d'une case vide dans la séquence de chiffres en MDT. Chacune de ces procédures exécute une série d'actions comme le présente le Tableau suivant.

Tableau 2.4.1 : ADAPT_{BASIC} : procédures de transcodage des nombres jusqu'à 99

Procédure	Condition	Action
Pa	Entrée = unité	Trouver PV en MLT
	Case vide = non	Placer PV en chaîne Arrêter
Pa'	Entrée = unité	Trouver PV en MLT
	Case vide = oui	Placer PV en case vide Arrêter
Pb	Entrée = Dizaine	Trouver PV en MLT
	Case vide = non	Placer PV en chaîne Placer une case vide - en chaîne Lire l'entrée suivante
Pc	Entrée = dix	Ajouter 1 au nombre en chaîne
	Case vide = oui	Lire l'entrée suivante
Pd	Entrée = particuliers	Trouver PV en MLT
	Case vide = non	Placer 1 en chaîne Placer une case vide - en chaîne Placer PV en case vide Arrêter
Pd'	Entrée = particuliers	Trouver PV en MLT
	Case vide = oui	Ajouter 1 au nombre en chaîne Placer PV en case vide Arrêter
Pe	Entrée = fin	Arrêter
	Case vide = non	
Pe'	Entrée = fin	Remplir case vide avec zéro
	Case vide = oui	Arrêter

PV : valeur positionnelle, MLT : mémoire à long terme

En anglais le transcodage des nombres exigent seulement les règles: Pa, Pa', Pb, Pd, Pe et Pe'

Les exemples suivants permettent de comprendre l'application de ces procédures :

Tableau 2.4.2: Exemples de transcodage selon ADAPT_{BASIC}: un exemple pour chaque catégorie lexicale de nombres de 1 à 99

Condition	Règle	Action
Unité = « Cinq » Case vide = non	Pa	Trouver 5 en MLT placer 5 en chaîne
	Pe	Arrêter
Dizaine simple = « Vingt » Case vide = non	Pb	Trouver 2 en MLT placer 2 en chaîne Placer une case vide → 2_
		Lire l'entrée suivante → « fin »
« fin de la chaîne » Case vide = oui	Pe'	Remplir case vide avec zéro Arrêter
Particulier = « Douze » Case vide = non	Pd	Trouver 2 en MLT Placer 1 en chaîne Placer une case vide - en chaîne Placer 2 en case vide
« fin de la chaîne »	Pe	Arrêter
Dizaine complexe = « Soixante-dix » « soixante » = Dizaine Case vide = non	Pb	Trouver 6 en MLT Placer 6 en chaîne Placer une case vide - en chaîne Lire l'entrée suivante
« dix » = Dizaine Case vide = oui	Pc	Ajouter 1 au nombre en chaîne Lire l'entrée suivante
« fin de la chaîne »	Pe'	Remplir case vide avec zéro Arrêter
Dizaine-unité simple = « vingt-quatre » « vingt » = Dizaine Case vide = non	Pb	Trouver 2 en MLT placer 2 en chaîne Placer une case vide → 2_
		Lire l'entrée suivante → « quatre »
« quatre » = unité Case vide = oui	Pa'	Trouver PV en MLT → « 4 » Placer « 4 » en case vide
Entrée = « fin » Case vide = non	Pe	Arrêter
Dizaines-unité complexe = « Soixante-douze » « soixante » = Dizaine Case vide = non	Pb	Trouver 6 en MLT Placer 6 en chaîne Placer une case vide - en chaîne Lire l'entrée suivante
« Douze » = Particulier Case vide = oui	Pd'	Trouver 2 en MLT Ajouter 1 au nombre en chaîne Placer 2 en case vide
« fin de la chaîne »	Pe	Arrêter
Dizaines-unité complexe = « Soixante-dix-huit » « soixante » = Dizaine Case vide = non	Pb	Trouver 6 en MLT Placer 6 en chaîne Placer une case vide - en chaîne Lire l'entrée suivante
« dix » = Dizaine Case vide = oui	Pc	Ajouter 1 au nombre en chaîne Lire l'entrée suivante
« huit » = unité Case vide = oui	Pa'	Trouver 8 en MLT Placer 8 en case vide
« fin de la chaîne »	Pe	Arrêter

En accord avec le modèle PARSEUR de Perruchet & Vinter (1998), ADAPT suppose que les groupes de primitives qui sont fréquemment perçues en succession temporelle directe amènent à la formation de nouvelles unités représentationnelles. Ces dernières vont par conséquent guider le processus de « parsing » qui les identifie et segmente la chaîne numérique verbale à partir de ces nouvelles unités représentationnelles. Ainsi, avec le développement, certains groupes de primitives comme par exemple « soixante-dix », « quatre-vingt » et « quatre-vingt dix » sont représentés en mémoire à long terme comme des unités et vont être identifiés par le « parsing » en tant que tels. Dans ce cas, il ne sera plus nécessaire d'appliquer la règle « Pc » responsable du traitement de la primitive « dix » lors qu'elle apparaît après une dizaine comme c'est le cas pour les dizaines complexes « soixante-dix » et « quatre-vingt dix » (Tableau 2.4.1). Plus généralement, toutes les formes fréquentes ou familières (année de naissance, code postal,...) vont progressivement être associées à leur forme en chiffres et récupérées telles qu'elles en mémoire.

Ainsi, les enfants apprennent d'abord à réciter puis à transcoder les nombres de 1 à 9 et ensuite de 10 à 99 et ainsi de suite. Par conséquent, ils apprennent d'abord le code phonologique et celui en chiffres des nombres DU, ce qui favorise le stockage de ces formes en MLT. ADAPT suppose que les premières formes des dizaine-unité (DU) comme par exemple (dix-sept, dix-huit et dix-neuf) mais aussi les formes de dizaines (trente, quarante,...), vu leur fréquence et leur âge précoce d'apprentissage, seraient traitées comme des unités par le processus de « parsing » et associées directement à leur forme correspondant en chiffres en MLT (*e.g.*, dix-neuf → 19, quarante → 40). Ainsi leur transcodage demande simplement une récupération des formes en chiffres correspondant en MLT au lieu d'appliquer les règles Pb, Pa' et Pe pour les DU et Pb, Pe' pour les dizaines comme proposé par ADAPT_{BASIC}. Par conséquent, avec l'apprentissage, toutes ces règles d'ADAPT_{BASIC} vont être remplacées dans ADAPT_{ADV} par une seule règle de récupération P1 (*cf. supra* Tableau 1.2.1, ADAPT_{ADV}).

Types d'erreurs éventuels expliqués par le modèle :

Ainsi, un enfant dans une situation de transcodage numérique de la forme verbale à la forme en chiffres va se trouver devant deux possibilités : la première est de réussir sa tâche en appliquant correctement les règles de transcodage nécessaires. Dans le cas contraire, l'échec peut s'expliquer par l'absence d'une des règles appropriées pour transcoder un nombre donné ou par une application incomplète d'une règle, c'est à dire l'exécution d'une action parmi l'ensemble des actions requises. Cependant toutes les erreurs ne sont pas dues qu'aux difficultés d'application de règles. En effet, d'autres erreurs peuvent s'expliquer par l'absence

des connaissances nécessaires en MLT (c'est à dire les formes en chiffres correspondantes aux formes verbales à transcoder) ainsi qu'au coût cognitif de traitement de l'information en MDT.

Par exemple, dans la catégorie « **Unités** », une règle Pa est requise pour récupérer la forme en chiffres, correspondante à la forme verbale, en MLT. Si le lien entre la forme verbale et la forme correspondante en chiffres n'est pas assez fort, une forme en chiffres inappropriée serait récupérée. Par exemple au lieu de récupérer la forme en chiffres « 2 » pour « deux » en verbal, une autre forme en chiffres comme « 5 » pourrait être récupérée. Par contre, la règle Pe indique toujours la fin de la chaîne numérique verbale.

Dans la catégorie « **Dizaines-simples** », pour transcoder « vingt » en « 20 » il faut appliquer deux règles : Pb et Pe'. La première étant requise pour transcoder les dizaines et comporte deux actions : « récupérer la valeur positionnelle en MLT » et « placer une case vide ». La deuxième, servira à remplir la case vide créée par Pb en fin de chaîne par zéro. Un transcodage erroné du nombre « vingt » peut engendrer donc plusieurs types d'erreurs dus à une application incomplète de règles ou à une application d'une règle non appropriée. Un enfant qui écrit « 2 » pour vingt, a appliqué une partie seulement de la règle Pb qui est l'action « trouver valeur positionnelle en MLT », mais il a échoué à exécuter l'action « placer une case vide » et à appliquer la règle Pe' pour ajouter un zéro. En outre, un transcodage qui amène à écrire « 10 » pour « vingt » veut dire que l'enfant a échoué à trouver la valeur positionnelle de « vingt » qui est la première action de la règle Pb, par contre il a bien exécuté la deuxième action de Pb « placer une case vide » et la règle Pe' responsable de « remplir la case vide par zéro ». Dans un autre cas, une erreur peut être d'écrire « 21 » où la règle Pb est correctement appliquée mais pas la règle Pe'.

Dans la catégorie « **Particuliers** », pour transcoder le nombre « douze » une application incomplète de la règle Pd peut engendrer une erreur comme « 2 » si l'action « trouver la valeur positionnelle en MLT » était exécutée mais pas les actions « placer 1 en chaîne » et « placer une case vide », ce qui conduit à écrire un nombre dont la valeur positionnelle seulement est correcte (erreur de pile). Un autre type d'erreur est d'écrire « 13 » pour « douze », ce qui veut dire que l'action « trouver la VP en MLT » de la règle Pd a été correctement exécutée mais l'erreur se situe dans la récupération de la valeur positionnelle appropriée. Les autres actions « placer 1 en chaîne » et « placer une case vide » sont correctement exécutées. Ce qui conduit à écrire un nombre dont la valeur positionnelle est

erronée, mais la classe lexicale est correcte (ce que nous appelons une erreur de position dans la pile).

Quant aux nombres appelés « **Dix-unité** », c'est à dire les nombres 17, 18, 19, ils sont traités en utilisant les mêmes règles nécessaires pour transcoder les « **Dizaines-unités simples** » comme « vingt-quatre » par exemple, qui a besoin des règles Pb et Pa' pour être transcodé. Ainsi, un transcodage erroné pourrait conduire par exemple à écrire « 14 » au lieu de « 24 ». Dans ce cas, l'enfant a échoué à trouver la valeur positionnelle de « vingt » qui est la première action de la règle Pb et au lieu donc d'écrire 2 il a écrit 1. Par contre, il a exécuté la deuxième action de Pb « placer une case vide » et il a bien appliqué la règle Pa' « trouver 4 en MLT » et « placer 4 en case vide ». Dans un autre cas, un transcodage erroné de « vingt-quatre » pourrait amener à écrire « 204 ». Dans ce cas l'enfant ne dispose pas des règles de transcodage de dizaines-unités (Pb, Pa'), il transcode donc chaque unité verbale à part. C'est à dire, il applique les règles Pb, Pe' pour écrire « 20 » et puis la règle Pa pour écrire l'unité « 4 ».

Les structures numériques complexes

Les nombres complexes, dans la numération française de France, se situent entre 70 et 99. Leur transcodage exige selon ADAPT_{BASIC} l'ajout des règles spécifiques Pc, Pd' aux règles utilisées pour transcoder les Dizaines-simples et les Dizaines-unités simples. Ainsi, la règle Pc sera ajoutée pour transcoder les nombres 70, et 90, de 77 à 79, de 97 à 99 et la règle Pd' pour transcoder les nombres de 71 à 76 et de 91 à 96. Par conséquence, si ces règles spécifiques ne sont pas acquises, on devrait voir apparaître des erreurs de transcodage dues à ce manque et à l'utilisation donc des règles appliquées aux nombres plus petits (qui devraient être déjà acquises). Par exemple, pour transcoder le nombre « soixante-dix », il faut trois règles : Pb, Pc, Pe' (Tableau 2.4.2). Ainsi, si la règle Pc (responsable de l'ajout de 1 au nombre en chaîne) n'est pas encore acquise, ce transcodage amènerait à écrire par exemple « 6010 » ou « 610 ». Dans le premier cas « 6010 », chaque unité verbale est transcodée comme un nombre isolé (transcodage littéral), les règles de transcodage pour « soixante » Pb et Pe' étant appliquées une première fois ; ensuite, ces mêmes règles sont appliquées une seconde fois pour transcoder le nombre « dix ». Dans la deuxième erreur « 610 » les règles appliquées sont: Pb, Pb, Pe'. Ce sont donc les règles de transcodage pour les Dizaines simples qui sont utilisées.

Par ailleurs, pour le nombre quatre-vingt et les nombres qui suivent (de 81 à 99), si l'enfant n'a pas encore stocké en mémoire que « quatre-vingt » correspond à « 80 » en chiffres, on devrait observer des erreurs dues à la segmentation de la chaîne verbale en unités susceptibles d'être transcodées par l'application des règles utilisées pour des nombres plus petits. Par exemple, pour transcoder « quatre-vingt dix » il faut trois règles: Pb, Pc, Pe'. La règle Pb récupère la valeur positionnelle « 8 » et place une case vide « 8_ ». Ensuite, la règle Pc doit ajouter 1 au nombre en chaîne « 9_ », et à la fin, la règle Pe' remplit la case vide par 0 (« 90 ») puisque c'est la fin de la chaîne numérique à condition qu'il y ait une case vide à remplir. Ainsi, si un enfant ne connaît pas ce nombre et n'a pas en mémoire la forme en chiffres correspondant à « quatre-vingt », il va donc segmenter cette chaîne verbale en unités qu'il est capable de transcoder. C'est à dire qu'il va écrire par exemple « 42010 », où il applique les règles : Pa, Pb, Pe', Pb, Pe'. En outre, même si l'enfant connaît que « quatre-vingt » correspond à « 80 » en chiffres mais n'a pas encore la règle Pc, l'erreur qui peut se produire sur le nombre « quatre-vingt-dix » dans ce cas là est « 8010 » (c'est-à-dire que les règles appliquées sont dans ce cas Pb, Pe', Pb, Pe') ou « 810 » (Pb, Pb, Pe') ou même « 81 » (Pb, Pa'). De même, pour transcoder le nombre « quatre-vingt quinze », si la règle Pd' n'est pas acquise, l'erreur qui peut se produire est d'écrire « 815 ». Dans cette erreur l'enfant appliquerait les règles Pb, Pd.

L'étude longitudinale qui suit comportait trois passations réalisées avec chacun des deux niveaux (GS et CP). Ainsi, la comparaison entre ces deux niveaux, devait nous permettre de suivre l'évolution du système de transcodage au cours de la période de développement et d'apprentissage étudiée, c'est-à-dire, le passage d'un système de transcodage algorithmique utilisant des procédures de plus en plus élaborées à un transcodage qui a recours à la récupération directe en mémoire à long-terme. Ce dernier devait donner moins d'erreurs puisque toute application d'une procédure comporte potentiellement le risque de produire une erreur.

Comme le développement et l'efficacité du transcodage dépendent de l'accroissement du lexique de l'enfant et de la création par celui-ci de nouvelles règles à partir des règles qu'il connaissait déjà, on s'attend à ce que les enfants de GS et de CP diffèrent non seulement dans le taux d'erreurs produites mais aussi dans la nature de ces erreurs. Cette différence reflèterait l'état actuel du système de transcodage qui caractérise le stade développemental atteint, les différents types d'erreurs obtenus indiquant les règles de transcodage utilisées à un moment donné. Ainsi, pour chaque catégorie lexicale il sera question de voir quelles sont les règles

déjà acquises et celles qui ne sont pas encore mises en place. S'agissant des autres catégories complexes (Dc, DUc), concernant uniquement les enfants appartenant au groupe de CP, et par rapport auxquelles notre première étude avait révélé un certain nombre de difficultés, nous vérifierons si les règles nécessaires pour les transcoder étaient acquises. Dans la mesure où notre étude est la première spécifiquement consacrée à vérifier la progression des procédures de transcodage chez les enfants de 5 à 7 ans, elle garde un caractère exploratoire.

Méthode

Participants

Deux groupes d'enfants ont participé à cette étude longitudinale: le premier est composé de 44 enfants scolarisés en classe de grande section de maternelle (GS) dont 20 filles, âge moyen 5 ans et 2 mois, (écart-type = 3 mois) lors de la première passation. Le deuxième est composé de 40 enfants des classes de cours préparatoire (CP) dont 18 filles, âge moyen 6 ans et 2 mois, (écart-type = 5 mois), d'écoles de la région Bourgogne. L'étude s'est déroulée sur trois séances à deux mois d'intervalle (décembre, février, avril). Cette étude ne porte pas sur les enfants scolarisés dans les écoles situées dans les ZEP (zones d'éducation prioritaire) qui ont été traitées à part. Ont été également écartés les enfants redoublants.

Matériel

Vingt nombres ont été dictés en GS et quarante-deux en CP à chaque séance. Les nombres ont été choisis en fonction de leur structure lexicale et se répartissaient en 5 catégories pour les GS et en 7 catégories pour les CP : unités (U), particuliers (P), dix-unités (dix-U), dizaines simples (Ds). Cette dernière catégorie ne comportait que les nombres « dix » et « vingt » pour les GS, alors que pour les CP elle comportait toutes les dizaines inférieures ou égales à 60.

D'autre part, les dizaines unités simples (DUs) s'arrêtaient au nombre 29 pour les GS, et à 69 pour les CP. Par ailleurs, deux catégories supplémentaires étaient ajoutées dans la dictée : les dizaines complexes (Dc) c'est à dire les dizaines supérieures à 60 (*i.e.*, 70, 80, et 90), et les dizaines unités complexes (DUc) à partir de 71. Chaque catégorie de nombres nécessite des règles spécifiques de transcodage selon le modèle ADAPT_{BASIC} (voir Annexe 4). Dans chaque catégorie, nous avons sélectionné trois nombres fixes (qui étaient présentés à chaque

passation) et deux changeant d'une passation à l'autre. Les dix-unités qui ne sont que trois et les Dizaines (simples et complexes) se présentaient à chaque passation. Ainsi, en GS, quatorze nombres étaient fixes et six changeaient à chaque passation et en CP trente nombres étaient fixes et douze changeaient au cours des passations. Les nombres changeants ont été introduits pour vérifier que l'apprentissage pendant les trois passations s'applique aux catégories des nombres et pour éviter le biais de la répétition des mêmes nombres à chaque passation, c'est-à-dire le fait que les enfants apprennent les nombres eux-mêmes et les reproduisent dans les passations sans réel apprentissage de leur structure syntaxique.

Procédure

La tâche de dictée a été administrée collectivement en trois passations (en décembre, février et avril) pour les GS et les CP. Dans chaque passation, chaque enfant recevait une grille de réponse contenant 20 (en GS) ou 42 (en CP) dessins différents organisés en deux colonnes pour aider l'enfant à se repérer pendant la dictée. Dans cette grille, l'enfant devait écrire sa réponse successivement dans les cases appropriées. Ainsi, avant de dicter chaque nombre, l'expérimentateur précisait le dessin à côté duquel il fallait l'écrire. L'expérimentateur insistait afin que l'enfant écrive dans toutes les situations une réponse, même s'il n'avait pas encore appris à écrire correctement ces nombres. Chaque nombre était répété deux fois. L'expérimentateur vérifiait que chaque enfant avait eu le temps d'écrire sa réponse avant de dicter le nombre suivant.

Résultats

Le transcodage des vingt nombres en GS, et des quarante-deux nombres en CP a conduit à un corpus de 880 et 1680 réponses respectivement à chaque passation. Les pourcentages totaux d'erreurs et de non-réponses pendant les trois passations sont présentés dans le Tableau 2.4.3.

Tableau 2.4.3: Pourcentage d'erreurs total et de non-réponses (N) pour les deux âges et dans chaque passation

		Passation 1	Passation 2	Passation 3
GS	Erreur + N	53	41	33
	(écart-type)	(36)	(31)	(32)
	Erreur	12	13	11
	(écart-type)	(14)	(16)	(15)
	Non réponse (N)	41	28	22
	(écart-type)	(36)	(30)	(29)
CP	Erreur + N	41	25	16
	(écart-type)	(18)	(18)	(17)
	Erreur	22	14	8
	(écart-type)	(14)	(12)	(11)
	Non réponse (N)	20	11	9
	(écart-type)	(20)	(15)	(13)

Comme on peut le constater, les non réponses constituent un pourcentage plus élevé que le pourcentage d'erreurs produites par les enfants de GS et ce dans les trois passations. On remarque aussi que la moitié des non-réponses disparaît à la troisième passation. Contrairement aux erreurs dont le pourcentage est resté presque le même. Ce qui signifie que ces non-réponses se sont transformées en bonnes réponses et explique pourquoi elles n'apparaissent pas dans le pourcentage final des erreurs. Chez les enfants de CP, la configuration des résultats est toute différente puisque les erreurs étaient légèrement plus élevées que les non-réponses et diminuaient fortement entre la première et la troisième passation. Cette même tendance était également observée dans les non-réponses. Bien que toutes nos analyses statistiques aient utilisé le pourcentage global d'erreurs comportant les erreurs pures et les non-réponses, le commentaire précédent était nécessaire en ce sens qu'il nous a permis d'analyser la transformation des non-réponses soit en erreurs soit en bonnes réponses. Cette analyse est présentée ultérieurement. D'autre part, en raison de la forte proportion des non réponses chez les enfants du groupe de GS, qu'on peut justifier par le stade d'apprentissage actuel, les résultats de ce groupe nécessitent de suivre la manière dont ces non réponses se transformaient en erreurs ou évoluaient vers de bonnes réponses.

Nous observons donc que le groupe de GS commettait plus d'erreurs et de non-réponses que le groupe CP et ce aux trois passations. La dispersion des sujets était également plus grande dans le premier groupe. Pour vérifier l'évolution de la performance des enfants au cours du temps et avec le développement, une analyse de variance (ANOVA) A2 (niveau : GS vs CP) x P3 (Passation : P1 vs P2 vs P3) a été calculée sur le pourcentage d'erreurs produites en ne tenant compte que des 20 nombres communs entre les CP et les GS (Figure 2.4.1).

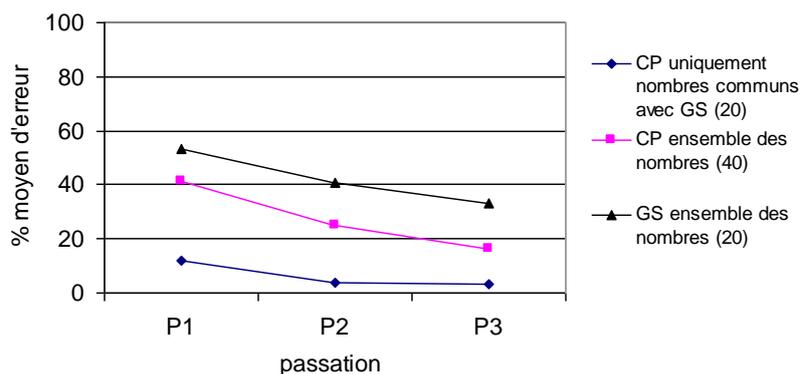


Figure 2.4.1: Pourcentage moyen d'erreurs pour les deux âges (GS, CP) et les trois passations

Nos résultats montraient que sur les nombres communs aux deux niveaux, les enfants de GS produisaient significativement plus d'erreurs que les enfants de CP (6%) $F(1, 82) = 49.99, p < .0001$ (Figure 1). La performance des enfants s'améliorait significativement d'une passation à l'autre (33%, 22%, 18%) $F(2, 164) = 30.75, p < .0001$. De plus, l'interaction âge x passation était significative $F(2, 164) = 4.13, p < .05$. La performance des enfants de GS s'améliorait significativement à chaque passation, mais celle de CP ne s'améliorait significativement qu'entre la première et la deuxième passation. Cette absence d'amélioration entre la deuxième et la troisième passation chez les enfants de CP est due à un effet plancher. D'ailleurs, la performance des enfants de CP s'améliorait significativement d'une passation à l'autre en tenant compte des pourcentages d'erreurs produites sur les 40 nombres dictés $F(2, 78) = 89.68, p < .0001$. Les enfants de CP produisaient significativement plus d'erreurs en première passation (41%) qu'en deuxième (25%) $F(1, 39) = 71.4, p < .0001$, et plus d'erreurs en deuxième qu'en troisième passation (16%) $F(1, 39) = 26.54, p < .0001$.

1. Groupe de Grande Section (GS)

Les erreurs de transcodage sur les nombres

Afin de suivre l'évolution dans le temps de la performance des enfants de ce groupe, nous présentons ci-après les pourcentages d'erreurs sur les vingt nombres dictés (fixes et changeants) dans les trois passations comme l'indique le tableau suivant :

Tableau 2.4.4 : Pourcentage moyen d'erreurs en GS sur chaque nombre dicté au cours de trois passations

Passation 1		Passation 2		Passation 3	
nombre dicté	% erreur	nombre dicté	% erreur	nombre dicté	% erreur
2	14	<i>1</i>	5	2	5
4	25	2	7	3	5
5	34	5	14	5	7
7	30	6	16	8	14
9	41	9	25	9	16
10	41	<i>10</i>	20	<i>10</i>	20
11	41	11	25	11	23
12	55	12	43	13	41
13	64	13	48	14	41
14	59	14	50	15	50
15	66	16	68	16	50
17	64	17	57	17	43
18	55	18	43	18	39
19	64	19	52	19	48
20	73	20	55	20	48
21	73	22	39	22	34
22	57	25	61	24	50
23	68	26	64	25	43
25	68	27	66	27	45
27	73	28	57	29	48

En **gras**, les nombres changeants au cours des trois passations

En *Italique* les nombres qui donnaient lieu à moins de 20% d'erreurs

Le Tableau 2.4.4 montre que le pourcentage d'erreurs sur chaque nombre fixe dicté diminuait d'une passation à l'autre. Ceci est également vrai pour le pourcentage moyen d'erreurs sur les nombres changeants qui diminuait pour les trois catégories lexicales : unité (27%, 10%, 9%), particuliers (60%, 56%, 50%) et Dizaines unités-simples (70%, 60%, 49%) respectivement. Ce qui pourrait indiquer que l'apprentissage était aussi observé lorsque des nombres, inconnus de l'enfant apparaissaient dans la liste dictée.

L'analyse des données de ce tableau révèle que parmi l'ensemble des nombres dictés aux enfants, certains donnaient lieu à moins d'erreurs que d'autres. A cet effet, nous avons considéré les nombres sur lesquels il y eu au moins de 80% de bonnes réponses comme des

nombre acquis. Ces nombres dont le pourcentage d'erreurs est donc inférieur à 20% sont présentés en Italique dans le tableau 2.4.4.

Ainsi, en première passation, plus de 80% des enfants ont réussi à transcoder correctement le nombre « 2 ». Par contre, les autres nombres continuaient à donner lieu à plus de 20% d'erreurs. En deuxième passation, les enfants connaissaient plus de nombres puisque plus de 80% parmi eux transcodaient correctement les nombres 1, 2, 5 et 6. Par contre les nombres plus grands continuaient à donner lieu à plus de 20% d'erreurs. En troisième passation, on peut supposer que tous les nombres appartenant à la catégorie « unité » avaient été appris. Dans la catégorie des dizaines simples, le nombre « 10 » a lui aussi été transcodé correctement par 80% des enfants et ce dès la deuxième passation. Cependant, les nombres supérieurs à 10 dans la dictée restaient plus difficiles (pourcentage d'erreur largement supérieur à 20%)

Erreurs de transcodage sur les structures lexicales des nombres :

Les 20 nombres dictés en GS appartiennent aux 5 catégories lexicales suivantes: U, P, Dix-U, Ds, DUs. La figure suivante présente les erreurs de transcodage observées sur chacune de ces catégories au cours des trois passations.

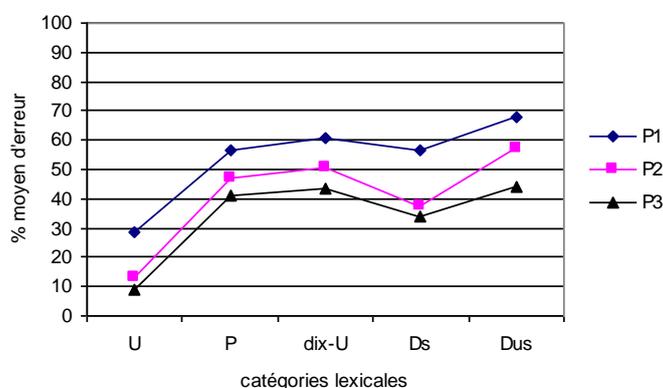


Figure 2.4.2: Erreurs de transcodage sur les différentes structures lexicales des nombres au cours des trois passations

Les résultats montrent (*cf.* Figure 2.4.2) que les erreurs produites sur les différentes structures lexicales diminuaient au cours des trois passations. Par ailleurs, les erreurs sur la structure « unité » étaient moins fréquentes que celles observées sur les autres structures. La structure « DUs » était par contre la plus difficile. Globalement, les erreurs diminuaient sensiblement entre la première et la troisième passation. Cette diminution était plus perceptible entre la première et la deuxième passation et moins entre la deuxième et la troisième passation. Ceci

était vrai pour l'ensemble des structures, particulièrement pour la structure des dizaines simples « Ds » dont les erreurs avaient chuté fortement en deuxième passation. D'autre part, on constate que les erreurs diminuaient entre la première et la troisième passation plus sur les deux structures « Ds et DUs » que sur les structures « U, P et Dix-U ».

Afin de vérifier l'effet de ces structures numériques sur la performance de transcodage chez les enfants de GS et son évolution pendant les trois passations, trois ANOVA à mesures répétées ont été effectuées sur le pourcentage d'erreurs commises par chaque sujet (F_1) sur chaque structure numérique (U, P, Dix-u, Ds, DUs). Trois autres ANOVA ont également été effectuées sur le pourcentage d'erreurs commises sur les 14 nombres fixes dictés (F_2) pendant les 3 passations.

Une première ANOVA révélait que la performance des enfants de GS différait significativement sur les différentes structures numériques $F_1(4, 172) = 41.37, p < .0001, F_2(4, 9) = 4.63, p < .05$. Afin de décomposer ce dernier effet, nous avons conduit des comparaisons entre les différentes structures. Toute comparaison entre les unités et les autres structures (Particuliers, Dix-U, Dizaines, et Dizaines-Unités) était significative. Les enfants ont produit significativement plus d'erreurs sur les Particuliers $F_1(1, 43) = 64.04, p < .0001, F_2(1, 9) = 7.38, p < .05$, Dix-U $F_1(1, 43) = 64.72, p < .0001, F_2(1, 9) = 12.79, p < .01$, Dizaines $F_1(1, 43) = 57.68, p < .0001, F_2(1, 9) = 5.61, p < .05$, et les Dizaines-Unités $F_1(1, 43) = 86.51, p < .0001, F_2(1, 9) = 14.79, p < .01$ que sur les Unités. En outre, Les enfants ont produit significativement plus d'erreurs sur les DUs que sur les Ds $F_1(1, 43) = 22.81, p < .0001$. Aucune autre comparaison deux à deux n'est significative. Comme nous l'avons déjà observé, leur performance s'améliorait significativement à chaque passation $F_1(2, 86) = 20.81, p < .0001, F_2(2, 18) = 112.03, p < .0001$. Par contre, les enfants se comportaient de la même façon sur ces différentes structures avec une amélioration d'une passation à l'autre, l'interaction structure x passation n'étant pas significative $F_1 < 1, F_2(8, 18) = 1.26$ N.S.

Ensuite, pour comprendre en quoi consistaient les erreurs produites sur les nombres dictés et la transformation de ces erreurs avec l'apprentissage, nous avons procédé au repérage de l'erreur principale c'est-à-dire la plus fréquente sur chaque nombre fixe. Elles sont présentées dans le Tableau 2.4.5 ci-après.

Tableau 2.4.5 : Nombre total d'erreurs et de non-réponses (inclus) sur chacun des nombres fixes dictés dans les 3 passations P1, P2 et P3

P1							S = 44						P2						P3					
Nbr	total d'err	Err	N	Err. *	n	F	total d'err	Err	N	Err. *	n	F	total d'err	Err	N	Err. *	n	F						
2	6	1	5	-		0,1364	2	0	2			0,0455	2	0	2			0,0455						
5	15	4	11	1	2	0,3409	6	0	6			0,1364	3	0	3			0,0682						
9	18	1	17	-		0,4091	11	3	8	6	3	0,2500	7	1	6	-		0,1591						
10	17	3	14	01	2	0,3864	8	1	7	-		0,1818	9	5	4	01	3	0,2045						
11	18	1	17	-		0,4091	11	2	9	-		0,2500	10	1	9	-		0,2273						
13	27	7	20	3	3	0,6136	21	8	13	31	2	0,4773	18	4	14	-		0,4091						
14	26	6	20	4 / 1	2 / 2	0,5909	22	7	15	-		0,5000	18	8	10	-		0,4091						
17	28	5	23	-		0,6364	25	7	18	27 / 71	2 / 2	0,5682	19	7	12	-		0,4318						
18	24	7	17	1	2	0,5455	19	4	15	81	2	0,4318	17	5	12	-		0,3864						
19	28	7	21	-		0,6364	23	5	18	91	2	0,5227	21	5	16	-		0,4773						
20	32	5	27	12	2	0,7273	24	4	20	12	2	0,5455	21	8	13	10	2	0,4773						
22	25	8	17	12 / 2	2 / 2	0,5682	17	6	11	12	3	0,3864	15	8	7	12	5	0,3409						
25	29	9	20	5	3	0,6591	27	12	15	15	5	0,6136	19	4	15	-		0,4318						
27	32	10	22	7	2	0,7273	29	13	16	17	5	0,6591	20	11	9	17	8	0,4545						
Total		74	251					72	173					67	132									

N.B : Seules les erreurs produites au moins par 2 sujets ont été rapportées.

* erreur principale le plus fréquemment produite.

n : nombres d'apparitions de l'erreur

Tiret (-) : indique les cas où il n'y avait pas une erreur principale (c'est-à-dire que la même erreur n'a pas été produite par plus d'un sujet)

N : non-réponse, F : fréquence totale des erreurs sur le nombre (réponses incorrectes y compris non-réponse)

Par exemple, le nombre total des erreurs sur le nombre 27 a diminué au cours des trois passations ainsi que le nombre de non réponses qui sont passées de 22 à la première passation à 16 en deuxième passation, et enfin elles sont descendues jusqu'à 9 à la troisième passation. Par ailleurs, l'erreur la plus fréquente produite sur ce nombre (27) a changé. Les enfants écrivaient 7 en première passation (2 erreurs / 10), 17 en deuxième (5 erreurs/13) et 17 aussi en troisième (8 erreurs /11). Mais le nombre d'enfants qui commettent cette erreur augmentait en même temps. Quelques non-réponses ont été transformées soit en réponses correctes soit en erreurs.

Pour comprendre cette transformation, nous présentons ci-après quelques cas individuels l'illustrant. Ces cas correspondent aux enfants ayant donné le pourcentage le plus élevé de non-réponses en première passation mais dont ces non-réponses se sont transformées dans les passations suivantes.

Le sujet 29

Ce sujet montre une progression importante de 100% à 50% entre la première et la troisième passation (Annexe 5). Il donnait 100% de non-réponses à la première passation. En deuxième passation une partie (40%) de ces non-réponses a été transformée en bonnes réponses alors que 60% de non-réponses demeurent sans changement. En troisième passation, les erreurs commençaient à apparaître. Ainsi cet enfant produisait 45% d'erreurs et seulement 5% de non-réponses. Comme cela a été déjà mentionné précédemment, ces non-réponses sont devenues soit des erreurs soit des réponses correctes.

En deuxième passation, lorsque l'on prend en compte les nombres sur lesquels se produisaient des réponses correctes, nous observons que ces nombres étaient tous des unités, plus « 10 », « 11 » et « 22 ». Par contre, en troisième passation, toutes les bonnes réponses sur ces nombres étaient maintenues sauf celle sur le nombre « 22 » transformée en erreur (12), et d'autres bonnes réponses sont apparues également dans les catégories « particuliers » et « dix-unité ». Par ailleurs, excepté une seule non-réponse, le reste a été commuté en erreurs apparaissant sur tous les nombres Dizaine-unité simple dictés. Toutes les erreurs de cet enfant étaient de nature lexicale, par exemple écrire « 19 » pour « vingt-neuf », « 12 » pour « quatorze », et « 11 » pour « quinze ».

Sujet 36

Sur le total des erreurs produites (erreur+non réponses) la progression de ce sujet était importante entre la première et la troisième passation (de 75% à 25% respectivement, Annexe 5). Ainsi 50% de ses réponses étaient des non-réponses et 25% des erreurs, à la première passation. En deuxième passation, nous constatons que ses non-réponses diminuaient à 25% tandis que ses erreurs augmentaient à 35% ce qui signifie qu'une partie de ces non-réponses se transformait soit en bonnes réponses soit en erreurs. En troisième passation, aussi bien les non-réponses que les erreurs diminuaient sensiblement (10% et 15% respectivement). Ceci montrait que certaines erreurs ainsi que quelques non-réponses s'étaient transformées en bonnes réponses.

Lorsque l'on observe les nombres dont le transcodage était réussi à la première passation, on se rend compte qu'ils appartenaient uniquement à la catégorie « unités » tandis que, sur les autres nombres dictés, beaucoup de non-réponses et quelques erreurs étaient produites. Lors de la deuxième passation, de nouvelles bonnes réponses s'ajoutaient. Celles-ci étaient sur les nombres « 10 » (sur lequel l'enfant donnait une non-réponse à la 1^{ère} passation), 13 (sur lequel l'enfant avait écrit « 3 » en 1^{ère} passation), « 18 » et « 19 » (sur lesquels l'enfant

produisait des non-réponses à la 1^{ère} passation. Les non-réponses restantes se situaient essentiellement dans la catégorie « particuliers », et aussi sur les nombres « 20 » et « 22 ». Les nombres restants dans la catégorie Dizaine-unité simple donnaient lieu à des erreurs correspondant en majorité à la suppression d'un chiffre comme écrire « 5 » pour « vingt-cinq » et « 7 » pour « vingt-sept ». A la troisième passation, nous constatons que l'enfant a transcodé correctement plus de nombres qu'avant comme « 20 » et tous les nombres Dizaines-unités simples dictés. Ses erreurs restantes se situaient essentiellement dans la catégorie « particuliers » plus une erreur sur le nombre « 19 » (Dix-unité).

Comme on peut le constater, ce dernier enfant (sujet 36) montrait une performance de transcodage plus avancée que l'enfant précédemment présenté (sujet 29). En effet, l'analyse de ses erreurs suggérait qu'il amorçait l'acquisition des règles de transcodage. Par exemple, en deuxième passation il a transcodé correctement le nombre « 10 », et puisqu'il savait déjà transcoder les unités il a réussi à transcoder les nombres « 18 » et « 19 ». Au moment de cette passation, il ne savait pas encore transcoder le nombre « 20 », ce qui l'amenait à donner des erreurs sur les Dizaines-unité dictées (nombres avec 20). Enfin, en troisième passation, il a transcodé « 20 » correctement ainsi que tous les nombres Dizaine-unités dictés qui viennent avec.

L'analyse des erreurs présentées précédemment dans le Tableau 5 nous a aidé à inférer les règles de transcodage appliquées par les enfants pour écrire un nombre donné. Prenant par exemple le nombre 25 et regardant comment les enfants l'avaient traité. Selon ADAPT_{BASIC} le transcodage de 25 suppose l'application de la Règle Pb (trouver la valeur positionnelle en MLT à savoir 2, placer une case vide 2_) et puis la règle Pa' pour récupérer la valeur positionnelle de l'unité, en l'occurrence 5, et la placer dans la case vide créée par la règle Pb pour avoir finalement 25.

En première passation, l'erreur la plus fréquente sur ce nombre était d'écrire « 5 » (observée trois fois). Ce qui signifie qu'aucune des règles précédentes n'a été appliquée pour transcoder le nombre 25. Par contre la règle Pa, inappropriée dans ce cas a été appliquée. Cette règle qui est déjà connue est responsable de la récupération de l'unité seule c'est à dire 5.

En deuxième passation, l'erreur la plus fréquente sur le nombre 25 (également pour le nombre 27) est devenue « 15 » (observée 5 fois). La règle appliquée cette fois était la bonne (Pb) sauf que la première action de cette règle (trouver la valeur positionnelle en MLT ici 2) a échoué à

récupérer la bonne valeur. La valeur positionnelle récupérée à sa place était donc celle de 10 correspondant à 1. La deuxième action de Pb (placer une case vide) était correctement exécutée 1_. Ensuite, la règle Pa' a été appliquée correctement. Cette règle est requise pour récupérer la valeur positionnelle de l'unité (5 dans 25), qui a été placée dans la case vide créée précédemment par la règle Pb ce qui a donné 15 pour 25. Ce type d'erreur continuait à se produire aussi sur les nombres 22 et 27 en troisième passation.

Ordre d'acquisition des règles :

L'analyse des erreurs les plus fréquentes présentées au tableau 2.4.5 a permis de voir que le transcodage des nombres suivait certaines règles et que globalement celles appliquées aux premiers nombres appris (comme les unités et dix) étaient utilisées pour transcoder des nombres plus grands.

Il faut rappeler que les règles de transcodage de l'ADAPT_{BASIC} s'appliquent aux catégories lexicales des nombres. C'est pourquoi et afin de vérifier l'ordre d'acquisition de ces règles nous avons procédé au dépouillement de l'ensemble des erreurs produites sur tous les nombres dictés. Puis, nous avons tenté d'inférer à partir des erreurs, des actions exécutées dans chaque règle appliquée. La figure suivante présente l'application des différentes règles de transcodage dans les trois passations :

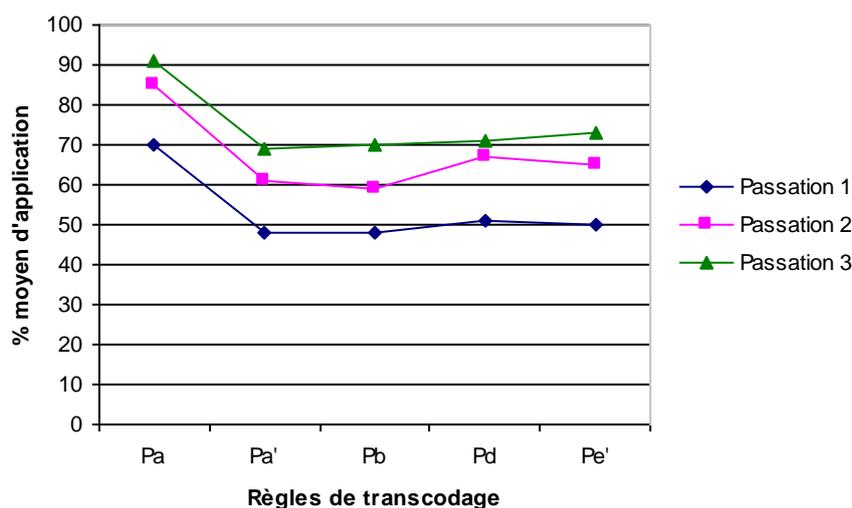


Figure 2.4.3 : Application des différentes règles de transcodage lors des trois passations

D'après la figure 2.4.3, il apparaît que la règle de transcodage Pa est celle qui a été le plus appliquée dans les trois passations : 70%, 85%, 91% respectivement. Avec cette règle on peut

transcoder les nombres « unités ». Elle comporte l'action suivante : « Trouver VP en MLT » et placer cette VP en chaîne.

Les autres règles étaient moins appliquées que la règle Pa et cela dans toutes les passations. Ainsi, la règle Pd qui est responsable de transcoder les nombres « Particuliers » était appliquée moins fréquemment que Pa (51%, 67%, 71%) dans les trois passations mais un peu plus que les autres règles : Pa' (48%, 61%, 68%), Pb (48%, 58%, 70%) et Pe' (50%, 66%, 73%) qui servent à transcoder l'unité conditionnée par la présence d'une case vide à remplir (Pa'), les dizaines (Pb) et en fin pour la règle Pe' remplir la case vide par zéro à la fin de la chaîne) à la première et à la deuxième passation. Par contre, à la troisième passation la règle Pe' s'appliquait plus que Pd.

Analyse qualitative des erreurs de transcodage

Afin d'analyser les changements dans les processus de transcodage avec le développement nous avons effectué une analyse qualitative des erreurs produites par les enfants. Comme cela a été fait dans l'étude d'ADAPT, les erreurs observées dans notre échantillon ont été aussi classées selon leur nature lexicale ou syntaxique. Une erreur est dite lexicale lorsqu'elle concerne le remplacement d'un ou de plusieurs chiffres corrects par un ou plusieurs chiffres erronés. Le nouveau nombre qui en résulte, ne diffère pas du nombre correct dans sa taille (nombres de chiffres le composant). Dans les erreurs lexicales, nous distinguons 3 types d'erreurs. Premièrement, l'erreur de pile est observée lorsque le nombre écrit par l'enfant appartient à une autre catégorie lexicale mais les positions de la cible et de l'erreur sont identiques dans leur catégorie respective: par exemple « quatorze » écrit 40. En ce qui concerne les DU, nous avons considéré les groupes de 21 à 29, de 31 à 39, etc. comme des piles distinctes. Ainsi, écrire 22 pour 32 constituait une erreur de pile. Le deuxième type d'erreur est celui de la position dans la pile. Dans ce cas, la catégorie lexicale est maintenue mais c'est la position au sein de la catégorie qui est erronée comme par exemple écrire 12 pour « onze ». Un troisième type d'erreur concerne la substitution de chiffres. Il désigne le remplacement d'un chiffre dans le nombre par un autre. Cependant, cette erreur ne correspond à aucun des types d'erreurs décrit précédemment : par exemple « quarante » écrit 41 est une erreur qui n'est ni une erreur de pile ni une erreur de position dans la pile, pourtant un des deux chiffres du nombre dicté est correct. Un dernier type d'erreurs correspondait à l'inversion des deux chiffres dans un nombre de 10 à 99 comme par exemple écrire 01 pour « dix » ou 21 pour « douze ».

Les erreurs syntaxiques sont celles dont la structure syntaxique est fautive alors que la classe lexicale est respectée. Par exemple, le transcodage de « dix sept » par « 18 » constitue une erreur lexicale tandis que cette même séquence transcodée « 107 » constitue une erreur syntaxique. Les erreurs syntaxiques regroupent le transcodage littéral et la suppression de chiffres. Le transcodage littéral peut être soit complet lorsque chaque élément de la chaîne verbale dictée est transcrit comme un nombre isolé, comme écrire « 42013 » pour « quatre vingt treize », soit partiel et correspond au transcodage d'une partie de la chaîne numérique verbale, comme écrire « 4107 » pour « quatre-vingt-dix-sept ». La suppression d'un chiffre correspond au cas où l'enfant transcode le nombre dicté en supprimant un de ses deux chiffres comme écrire « 1 » pour « quatorze ». Ce type d'erreur est à distinguer de l'erreur lexicale dite de pile quand l'enfant supprime 1 et laisse 4 dans ce même exemple. D'autres erreurs qui ne correspondent à aucune de ces catégories ont été définies comme « inclassables ». Certains types d'erreurs comme écrire « 8013 » pour « quatre-vingt-treize » ont été comptés parmi les erreurs de type transcodage littéral complet. Cependant, comparé à l'enfant qui écrit « 42013 », celui qui écrit « 8013 » pour « quatre-vingt-treize » présente certes un niveau de connaissance meilleur.

Evolution des erreurs selon leur nature au cours des trois passations :

Les erreurs produites sur les catégories lexicales des nombres ont été analysées au cours des trois passations. Cette analyse inclut uniquement les types d'erreurs produites au moins deux fois à l'intérieur d'une catégorie (ce ne sont donc pas les types d'erreurs produites deux fois sur le même nombre mais dans la même catégorie de nombre qui ont été classées) (Tableau 2.4.6). Par exemple, dans la catégorie « Particuliers » une erreur comme écrire « 11 » sur « treize » est une erreur du même type que celle consistant à écrire « 12 » sur « quinze ». Ainsi ces deux erreurs ont été classées comme erreurs de position dans la pile.

Tableau 2.4.6 : Nombre et pourcentage des erreurs classées à chaque passation en GS

	Passation 1	Passation 2	Passation 3
Nombre total d'erreurs			
sans les non-réponses	106	115	97
Nombres d'erreurs classées	101	110	92
% d'erreurs classées	95%	96%	95 %

Ainsi, avons-nous pu classer 95% des erreurs en première passation, 96% en deuxième et 95% en troisième. Les erreurs non classées étaient des erreurs produites une seule fois et pourraient donc être dues au hasard.

La figure ci-après illustre l'évolution des erreurs lexicales et syntaxiques pendant les trois passations.

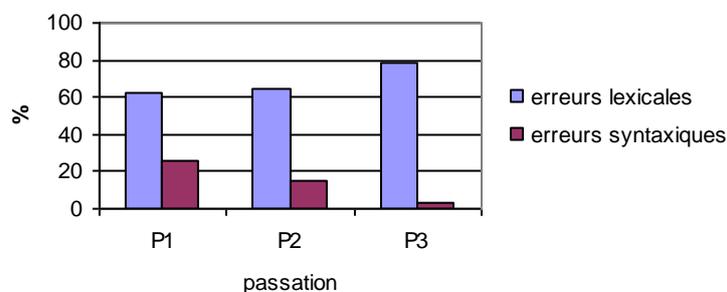


Figure 2.4.4: Evolution des erreurs lexicales et syntaxiques pour les trois passations en GS (en % sur le total d'erreurs classées)

Au total, les enfants de GS produisaient plus d'erreurs lexicales (207 erreurs) que d'erreurs syntaxiques (57 erreurs) et ce pendant les trois passations (Figure 2.4.4). Parmi les erreurs lexicales, les erreurs de pile étaient les plus fréquentes et augmentaient d'une passation à l'autre (23%, 31 % et 43% des erreurs pour les passations P1, P2, P3 respectivement, figure 2.4.4). Par contre, les erreurs de position dans la pile diminuaient progressivement (16%, 14% et 11% respectivement). Quant aux erreurs de substitution, elles enregistraient une légère augmentation (11%, 12% et 17% respectivement) alors que les erreurs d'inversion baissaient (14%, 14% et 7% respectivement) (Figure 2.4.5).

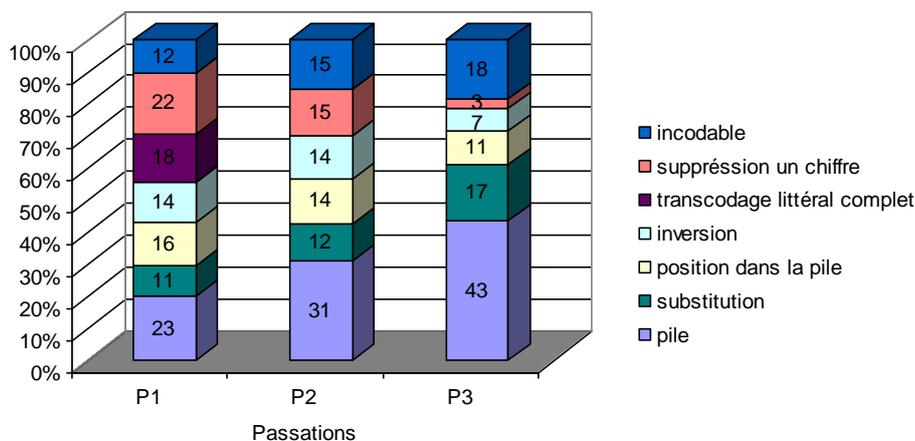


Figure 2.4.5: Répartition des différents types d'erreurs lexicales et syntaxiques pour les trois passations en GS (en %)

S'agissant des erreurs syntaxiques, le transcodage littéral complet n'était observé qu'à la première passation (18%) et disparaissait après, tandis que l'erreur de suppression diminuait sensiblement d'une passation à l'autre. De 22% en première passation, le pourcentage d'erreurs est passé à 15% en deuxième et seulement à 3% en dernière passation.

Par ailleurs, les différents types d'erreurs décrits précédemment ont été répartis sur les cinq catégories lexicales des nombres. Cette répartition est présentée dans le Tableau 2.4.7 suivant :

Tableau 2.4.7: Répartition de différents types d'erreurs sur les catégories lexicales pour les trois passations en GS

	Erreur pile			Substitution			Position dans pile			Inversion D/U			Suppression chiffre			littéral complet		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
U							100	100	100									
P	35	15	21		18	33	22	21	25		15		22	9				
dix-u	12	36	19	29		31					21	13	24	21	19	18		
Ds	29	50					29		18	29	50	36						
DUs	21	42	82	13	13	8	4	4		13	4		23	19				

La case vide indique 0%

Comme nous le constatons à partir des données présentées dans ce tableau, les erreurs produites sur les « unités » étaient exclusivement de type « position dans la pile » comme par exemple écrire « 3 » pour « cinq ».

Par ailleurs, les erreurs produites sur les « particuliers » étaient en majorité plus lexicales que syntaxiques et plutôt de type « erreur de pile » et de « position dans la pile ». Les erreurs de substitution, quant à elles, étaient absentes au début des passations mais apparaissaient ensuite pour atteindre à la troisième passation le pourcentage d'erreurs le plus élevé parmi tous les autres types d'erreurs. Les erreurs syntaxiques de type « suppression » diminuaient sensiblement pour disparaître en fin de compte.

Sur les « Dix-unités », les erreurs lexicales dominaient globalement. Parmi celles-ci l'erreur de pile était la plus fréquente. En outre, aucune erreur de position dans la pile n'avait été observée. La suppression était l'erreur syntaxique qui apparaissait le plus mais diminuait légèrement d'une passation à l'autre. L'erreur de transcodage littéral complet ne s'était produite qu'à la première passation et était restée moins fréquente que l'erreur de suppression.

Dans la catégorie « Dizaines-simples », les erreurs lexicales de type « inversion » étaient les plus observées dans les trois passations (29%, 50% et 36% respectivement) suivies par les erreurs de pile qui, elles, disparaissaient complètement lors de la troisième passation et enfin viennent les erreurs de position qui diminuaient entre la première et la dernière passation. Par ailleurs, aucune erreur de substitution n'avait été observée, tout comme les erreurs syntaxiques qui étaient elles aussi absentes.

Les erreurs produites sur la catégorie des « Dizaines-unités » continuaient à être plus lexicales que syntaxiques. Les erreurs étaient en majorité de type erreur de pile, dont le pourcentage augmentait fortement avec les passations. Les erreurs de position dans la pile étaient les moins fréquentes et disparaissaient en fin de passations. Les erreurs de substitution apparaissaient aussi mais moins fréquemment que les erreurs de pile et contrairement à ces dernières elles diminuaient progressivement. Cette remarque s'appliquait également aux erreurs de type inversion à la différence que ces dernières disparaissaient complètement à la troisième passation. S'agissant des erreurs de type syntaxique, seules les erreurs de suppression apparaissaient aux deux premières passations puis disparaissaient. Enfin, aucune erreur de type « littéral complet » n'était observée.

2. Groupe de Cours préparatoire (CP)

Les erreurs de transcodage sur les nombres

Comme cela a été fait pour le groupe GS nous présentons ci après les pourcentages d'erreurs sur les 42 nombres dictés (fixes et changeants) dans les trois passations comme l'indique le tableau suivant :

Tableau 2.4.8 : Pourcentage moyen d'erreurs (non-réponses inclus) en CP sur chaque nombre dicté au cours de trois passations

P1		P2		P3	
nombre dicté	% erreurs	nombre dicté	% erreurs	nombre dicté	% erreurs
2	0	<i>1</i>	0	2	0
4	0	2	0	3	0
5	3	5	0	5	0
7	0	6	0	8	0
9	5	9	0	9	3
10	5	10	0	10	0
11	8	11	3	11	3
12	5	12	5	13	5
13	5	13	8	14	5
14	30	14	10	15	10
15	18	16	3	16	3
17	18	17	3	17	5
18	15	18	5	18	3
19	18	19	5	19	8
20	8	20	5	20	0
21	15	22	0	22	3
22	15	25	10	24	5
23	18	26	8	25	0
25	25	27	8	27	8
27	33	28	3	29	3
30	25	30	8	30	10
33	13	33	8	33	0
40	35	37	8	40	13
47	13	40	13	42	3
50	35	47	15	47	5
52	25	50	18	50	8
60	40	60	15	55	0
68	38	68	25	60	10
70	88	70	63	68	8
72	95	73	68	70	35
73	95	75	55	73	38
77	85	78	63	74	38
78	90	79	55	77	35
79	93	80	53	78	35
80	88	82	55	79	38
89	85	90	68	80	38
90	90	91	65	90	55
91	93	92	65	91	55
93	95	95	68	94	58
95	93	97	68	95	48
97	90	98	63	97	53
98	93	99	65	99	48

En **gras** les nombres changeants au cours de passation

En *Italique* les nombres qui donnaient lieu à moins 20% d'erreurs

Le Tableau 2.4.8 montre que, globalement, le pourcentage d'erreurs sur chaque nombre fixe dicté diminuait entre la première et la dernière passation. Ceci est également vrai pour le pourcentage moyen d'erreurs sur les nombres changeants qui diminuait pour les quatre catégories lexicales : unités (0%, 0%, 0%), particuliers (11%, 4%, 6%), Dizaines unités-simples (19%, 6%, 3%) et Dizaines unités complexes (91%, 61%, 44%) respectivement. Nous

pouvons en déduire que les enfants réussissaient aussi bien à transcoder les nouveaux nombres qui changeaient au cours des trois passations que ceux qui apparaissaient de façon répétée.

Pour connaître quels étaient les nombres dont le transcodage ne posait pas de grands problèmes aux enfants au cours des trois passations, ceux qui suscitaient donc au moins 80% de bonnes réponses (moins de 20% d'erreurs) ont été considérés comme des nombres appris. Nous les avons présentés en italique dans le tableau. Ainsi en première passation, plus de 90% de bonnes réponses étaient observées dans le transcodage des nombres « unités » ainsi que sur les nombres « 10 » et « 20 » de la catégorie « dizaines simples ». Les enfants avaient transcodé correctement aussi, à plus de 80%, les particuliers «11, 13 et 15 », les dix-unités « 17, 18 et 19 », et quelques nombres de la catégorie dizaines-simples « 21, 22, 23, 33, et 47 ». Le reste des nombres continuait à donner lieu à plus de 20% d'erreurs. En deuxième passation, le transcodage était réussi par plus de 80% d'enfants sur tous les nombres sauf 68 et les nombres complexes qui continuaient à provoquer plus de 60% d'erreurs.

Lors de la troisième passation, seuls les nombres « complexes » donnaient encore lieu à plus de 20% d'erreurs. (40%) Tous les nombres des autres catégories avaient donc été appris (moins de 10% d'erreurs). Les nombres entre 70 et 99 (Dizaines-complexes et Dizaines-unités complexes) restaient donc plus difficiles à transcoder pour les enfants.

Erreurs de transcodage sur les structures lexicales des nombres :

Les 42 nombres dictés en CP appartiennent aux 7 structures lexicales suivantes: U, P, Dix-U, Ds, DUs, Dc et DUc. La figure 2.4.6 suivante présente les erreurs de transcodage observées sur chacune d'elles au cours des trois passations.

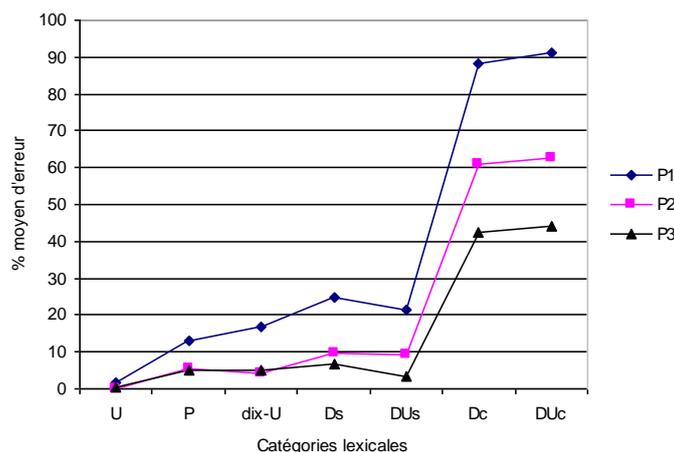


Figure 2.4.6: Erreurs de transcodage sur les différentes structures lexicales des nombres au cours des trois passations

La lecture de la figure précédente, indique que les erreurs sur l'ensemble des structures diminuaient d'une passation à l'autre. Les erreurs sur les nombres « unités » étaient très faibles et le restaient au cours des trois passations. Quant aux erreurs produites sur les autres structures « Particuliers », « Dix-unité », « Dizaines-simples » et « Dizaines-unités simples », elles étaient relativement peu fréquentes (moins de 30% dès la première passation). Certes, les erreurs sur les structures autres que « complexes » diminuaient sensiblement entre la première et la troisième passation mais leur diminution était encore plus perceptible entre la première et la deuxième passation qu'entre la deuxième et la troisième passation.

Les structures complexes « Dc » et « DUC » étaient par contre les plus difficiles et continuaient à donner plus de 40% d'erreurs même à la troisième passation. Cependant la diminution des erreurs sur ces structures restait importante, non seulement entre la première et la deuxième passation (d'environ 90% à 60%) mais aussi entre la deuxième et la troisième passation (de 60% à 40%). Malgré ce fort pourcentage résiduel d'erreurs sur cette structure, il faut signaler que les enfants avaient amélioré leur transcodage au cours de cette période d'observation, le taux d'erreurs diminuant de près de 50%.

Afin de vérifier l'effet de la structure numérique sur la performance des enfants de CP et son évolution pendant les trois passations, trois ANOVA {S40 * P3 (P1 vs P2 vs P3) * SN7 (structures numériques U, P, Dix-u, Ds, DUs, Dc, DUC)} à mesures répétées ont été effectuées sur le pourcentage d'erreurs commises par chaque sujet (F_1). Trois autres ANOVA {P3 (P1 vs P2 vs P3)* SN7 (U, P, Dix-u, Ds, DUs, Dc, DUC)} ont également été effectuées

sur le pourcentage d'erreurs commises sur les 30 nombres fixes dictés (F_2) pendant les 3 passations.

Les résultats de ces analyses montraient que la performance des enfants de CP différait significativement selon les structures numériques, $F_1 (5, 195) = 155.9, p < .0001, F_2 (6, 23) = 94.05, p < .0001$ et s'améliorait d'une passation à l'autre $F_1 (2, 78) = 81.73, p < .0001, F_2 (2, 46) = 113.03, p < .0001$. De plus l'interaction structures x passations était significative, $F_1 (10, 390) = 8.05, p < .0001, F_2 (12, 46) = 11.07, p < .0001$. Lors de l'analyse sur le F_1 nous n'avons pas pris en compte les pourcentages d'erreurs sur les unités, les enfants n'en ayant pas produit en deuxième passation.

La performance des enfants s'améliorait significativement sur les structures Dc ($p < .01$) et DUc ($p = .001$) entre la première et la deuxième passation uniquement (sur le F_1 et le F_2 test de Scheffé). Par contre, entre la deuxième et la troisième passation leur performance ne s'améliorait significativement que sur les structures DUc et uniquement sur le F_2 ($p < .05$). L'effet de passation n'était pas significatif pour toutes les autres structures (U, P, Dix-U, Ds, et DUs).

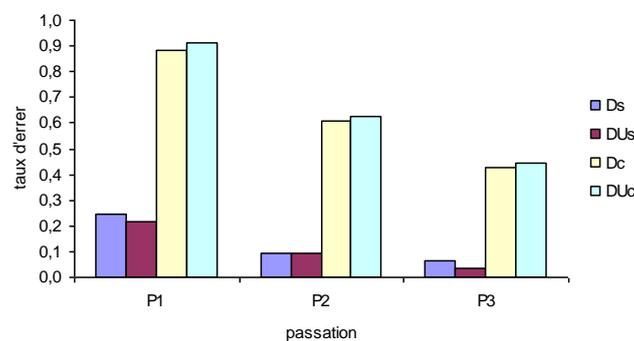


Figure 2.4.7: Taux moyen d'erreurs pendant les trois passations sur les structures Ds, Dc, DUs, DUc

Les structures simples (Ds, DUs) et les structures complexes (Dc, DUc) ont été comparées pendant les trois passations. Ainsi, avons-nous remarqué qu'entre la première et la deuxième passation, les enfants produisaient significativement plus d'erreurs sur les structures Dc par rapport au Ds, $F_2 (1, 23) = 5.22, p < .05$, et sur les structures DUc par rapport aux DUs $F_1 (1, 39) = 4.35, p < .05, F_2 (1, 23) = 13.24, p < .001$. Entre la deuxième et la troisième passation, les enfants produisaient significativement plus d'erreurs sur les structures Dc par rapport au Ds, $F_1 (1, 39) = 7.64, p = .01, F_2 (1, 23) = 13.29, p = .001$, aussi sur les structures DUc par rapport aux DUs, $F_1 (1, 39) = 5.55, p < .05, F_2 (1, 23) = 13.99, p = .001$ (Figure 2.4.7).

L'analyse des erreurs produites sur chacun des nombres fixes dictés (30 nombres) a montré que certaines erreurs étaient plus fréquentes que d'autres. Celles-ci ont été considérées comme des erreurs principales et ont été repérées afin de comprendre en quoi elles consistaient et de suivre leur transformation au cours des différentes passations (Tableau 2.4.9).

Tableau 2.4.9: Nombre total d'erreurs et de non-réponses (inclus) sur chacun des nombres fixes dictés dans les 3 passations P1, P2, P3

Nb	P1						P2						P3						
	nb total	Er	N	Erreur *	n	F	nb total	Er	N	Erreur *	n	F	nb total	Er	N	Erreur *	n	F	
2	0	0			0		0	0				0	0	0				0	
5	0	0			0		0	0				0	0	0				0	
9	2	0	2		2	0,05	0	0				0	1	1		-		0,03	
10	2	2		-		0,05	0	0				0	0	0				0	
11	3	0	3			0,08	1	1		-		0,03	1	1		-		0,03	
13	2	1	1	-		0,05	3	1	2	-		0,08	2	0	2			0,05	
14	12	9	3	44	3	0,3	4	4		41	3	0,1	2	2		-		0,05	
17	7	4	3	77	2	0,18	1	1		-		0,03	1	1		-		0,03	
18	6	3	3	88	2	0,15	2	0	2			0,05	1	1		-		0,03	
19	7	2	5	-		0,18	2	1	1	-		0,05	3	3		-		0,08	
20	3	0	3			0,08	2	2		-		0,05	0	0				0	
22	6	3	3	-		0,15	0	0				0	1	1		-		0,03	
25	10	8	2	15	5	0,25	4	2	2	-		0,1	0	0				0	
27	13	9	4	17	5	0,33	3	1	2	-		0,08	3	2	1	-		0,08	
30	10	4	6	33	3	0,25	3	3		13	2	0,08	4	4		13	2	0,1	
33	5	3	2	13	2	0,13	3	2	1	-		0,08	0	0				0	
40	14	8	6	44	4	0,35	5	1	4	-		0,13	5	3	2	14	2	0,13	
47	5	3	2	-		0,13	6	2	4	-		0,15	2	1	1	-		0,05	
50	14	6	8	5	2	0,35	7	3	4	-		0,18	3	2	1	-		0,08	
60	16	2	14	-		0,4	6	3	3	16	2	0,15	4	2	2	16	2	0,1	
68	15	3	12	-		0,38	10	3	7	608	2	0,25	3	0	3			0,08	
70	35	22	13	610	8	0,88	25	15	10	610	4	0,63	14	4	10	61	3	0,35	
73	38	18	20	613	8	0,95	27	13	14	613	4	0,68	15	7	8	63	4	0,38	
78	36	18	18	68	6	0,9	25	15	10	68	5	0,63	14	3	11	-		0,35	
79	37	20	17	619	5	0,93	22	14	8	69	8	0,55	15	9	6	-		0,38	
80	35	20	15	420	5	0,88	21	9	12	420/ 90 /42	02/02/2002	0,53	15	6	9	90 / 42	2 / 2	0,38	
90	36	20	16	42010 / 410	3 / 30	0,9	27	14	13	910 / 81 / 410	02/02/2002	0,68	22	9	13	41 / 80	3 / 3	0,55	
91	37	16	21	411	5	0,93	26	13	13	81 / 411	3 / 30	0,65	22	11	11	81	6	0,55	
95	37	18	19	45 / 415	4 / 40	0,93	27	13	14	85 / 42015 / 45	02/02/2002	0,68	19	8	11	85	5	0,48	
97	36	22	14	47	4	0,9	27	16	11	87	4	0,68	21	12	9	87	7	0,53	

N.B : Seulement les erreurs produites au moins par 2 sujets ont été rapportées.

* l'erreur principale le plus fréquemment produite. n : nombres d'apparitions de l'erreur

Tiré (-) : indique les cas où il n'y avait pas une erreur principale (c'est-à-dire que la même erreur n'a pas été produite par plus d'un sujet)

N : non-réponse, F : fréquence (nombre d'incorrectes réponses+ nombre de non-réponse)

Nb : nombre, Er : erreur

Globalement, le nombre d'erreurs et de non-réponses baissait entre les trois passations. L'analyse des erreurs principales présentées au tableau 9 nous a permis d'inférer les

différentes règles que les enfants appliquaient pour transcoder un nombre donné au cours des 3 passations.

Tableau 2.4.10 : erreurs les plus fréquentes de transcodage de quelques nombres et les règles appliquées

nombre	règle correcte	P1		P2		P3	
		erreur plus fréq	règle appliquée	erreur plus fréq	règle appliquée	erreur plus fréq	règle appliquée
70	Pb, Pc, Pe'	610	Pb, Pb, Pe'	610	Pb, Pb, Pe'	61	Pb, Pb
73	Pb, Pd'	613	Pb, Pd	613	Pb, Pd	63	Pb, Pd (VP)
78	Pb, Pc, Pa'	68	Pb, Pa'	68	Pb, Pa'	-	
79	Pb, Pc, Pa'	619	Pb, Pb, Pa'	69	Pb, Pa'	-	
80	Pb, Pe'	420	Pa, Pb, Pe'	420/ 90/ 42	Pa, Pb	90 / 42	
90	Pb, Pc, Pe'	42010 / 410	Pa, Pb, Pe', Pb, Pe'	910/ 81/ 410	Pb, Pb, Pe' / Pb, Pd (VP)	41 / 80	Pa, Pb /Pb, Pe'
91	Pb, Pd'	411	Pa, Pd	81/ 411	Pb, Pd / Pa, Pd	81	Pb, Pd (VP)
95	Pb, Pd'	45 / 415	Pa, Pd (VP)/ Pa, Pd	85/ 42015/ 45	Pb, Pd (VP)	85	Pb, Pd (VP)
97	Pb, Pc, Pa'	47	Pa, Pa'	87	Pb, Pa'	87	Pb, Pa'

VP : Valeur Positionnelles

Prenons l'exemple du nombre « 70 ». Selon ADAPT_{BASIC}, le transcodage de ce nombre de sa forme verbale « soixante-dix » en sa forme en chiffres « 70 » suppose l'application des trois règles suivantes : Pb, Pc, Pe'. Dans leur écriture de « 70 », les enfants avaient produit à la première passation un pourcentage très élevé d'erreurs (88%). La plus fréquente de celles-ci était d'écrire « 610 ». Elle a été constatée chez 20% d'entre eux. Concrètement, lorsque l'enfant entend « soixante-dix », il commence par récupérer la valeur positionnelle « 6 » et la placer en chaîne avec une case vide en appliquant la règle Pb. Ensuite, pour « dix » il réutilise la même règle Pb au lieu de Pc (qu'il ne possède pas encore) ce qui l'amène à récupérer la valeur positionnelle « 1 » et la mettre en case. Il poursuit en créant une autre case vide et en appliquant la règle Pe' responsable du zéro final « 10 ».

En deuxième passation, l'écriture de « 70 » entraînait moins d'erreurs que lors de la première passation (63%) mais demeurait l'erreur la plus fréquente. Environ 10% d'enfants continuaient à écrire « 610 » au lieu de « 70 ».

En troisième passation, le pourcentage d'erreurs sur ce nombre continuait à diminuer (35%). L'erreur la plus fréquente était d'écrire cette fois-ci « 61 ». Elle a été constatée dans les réponses de 8% d'enfants. Ces derniers appliquaient la règle Pb permettant de récupérer la valeur positionnelle du chiffre de dizaine (6) et faire une case vide, ensuite ils poursuivaient par la règle Pb qui leur permettait de récupérer la valeur positionnelle de « dix » et de la placer en case (1). Alors que normalement il leur fallait appliquer la règle Pc qui permet

d'ajouter 1 au nombre en chaîne et puis Pe' pour remplir la case vide avec zéro. Les enfants n'avaient donc pas utilisé les règles appropriées pour transcoder ce nombre complexe. Par contre, ils avaient tenté l'opération en appliquant les règles appropriées pour transcoder les Dizaines simples qu'ils connaissaient déjà. Comme pour « soixante-dix », le nombre « soixante-treize » entraînait les mêmes types d'erreurs pendant les trois passations. Il a donc été traité de la même façon. Par contre les nombres « soixante-dix-huit » et « soixante dix neuf » ont été traités différemment. Ainsi, le nombre « soixante-dix-neuf » était transcodé « 619 » en première passation, et « 69 » en deuxième, ce qui était aussi une erreur mais de nature différente de celle de « 619 ». Les nombres « 77, 78,79 » qui ont une forme verbale plus transparente que les nombres (de 71 à 76), permettaient aux enfants de trouver plus rapidement la valeur positionnelle du chiffre de l'unité et la placer en case vide en appliquant la règle Pa'.

Lorsque l'on arrive au nombre « quatre-vingt » (et les nombres qui le suivent jusqu' à 99) pour lequel l'énoncé verbal n'indique aucun des chiffres composant 80, on constate que celui-ci entraînait un pourcentage très élevé d'erreurs en première passation (88%). Pour 13% d'enfants l'erreur la plus fréquente était d'écrire « 420 ». Pour cette erreur, l'enfant qui entendait « quatre-vingt » et ne connaissait pas ce nombre, cherchait dans ses connaissances et trouvait la règle Pa qu'il appliquait pour récupérer la forme en chiffre « 4 » et il la mettait en chaîne. Ensuite pour « vingt » il disposait des règles appropriées pour l'écrire (Pb, Pe' qui sont selon ADAPT_{BASIC} les mêmes règles applicables à 80). Ces dernières lui permettaient de récupérer d'abord la valeur positionnelle de « vingt » à savoir « 2 » en appliquant Pb et la placer après « 4 » en chaîne en créant une case vide et enfin compléter la chaîne avec zéro en appliquant Pe'.

En deuxième passation, « 80 » s'écrivait encore « 420 » auquel s'ajoutaient les écritures « 90 » et « 42 ». Chacune de ces trois écritures erronées apparaissait deux fois (5%). Ecrire « 90 » pour le nombre « 80 » constituait une erreur de récupération de la valeur positionnelle en mémoire. C'est-à-dire qu'au lieu de récupérer « 8 » l'enfant récupérait « 9 ». L'erreur se situait donc au niveau de l'action responsable de trouver la valeur positionnelle de la règle Pb. Quant à l'erreur « 42 », les enfants suivaient la même démarche que pour l'erreur précédente « 420 » sauf qu'ils n'appliquaient pas la règle Pe' pour mettre zéro à la fin de la chaîne. En troisième passation, seules les deux erreurs fréquentes « 90 » et « 42 » apparaissaient encore alors que l'erreur « 420 » avait disparu.

Pour mieux saisir le sens de la transformation des différents types d'erreurs au cours des différentes passations, nous présentons ci-après quelques cas individuels les illustrant. Ces cas correspondent aux enfants ayant transcodé correctement les nombres dictés inférieurs à 70 mais qui s'étaient trompés sur tous les nombres complexes lors de la première passation. En général leurs erreurs diminuaient et changeaient de nature entre la première et la dernière passation.

Sujet 17

Chez cet enfant aucune non-réponse n'apparaissait à la première passation alors qu'à la deuxième, trois non réponses seulement étaient observées. Il a fourni un tiers de réponses incorrectes en première passation. Ses erreurs ont légèrement diminué en deuxième passation (33% et 31% respectivement, Annexe 6) alors que sa performance s'est nettement améliorée après, en ce sens qu'il arrivait à transcoder correctement l'ensemble des nombres qu'on lui avait dictés.

Tableau 2.4.11 : réponses données sur les nombres complexes

nbr	70	73	78	79	80	89	90	91	95	97
P1	6010	6013	68	6109	140	46	4010	1411	1415	1417
P2	610	630	61018		90	4202	910	911	42015	

Nombres complexes fixes pendant les trois passations. La case vide indique une réponse correcte

Ainsi « soixante-dix » était transcodé « 6010 », « soixante-treize » comme « 6013 » à la première passation (Tableau 2.4.11). Il ne savait pas transcoder ce nombre (ne disposant pas en MLT de la forme en chiffres correspondante) donc il transcodait chaque primitive lexicale composant ce nombre comme un nombre isolé. Ces erreurs se transformaient à la deuxième passation en « 610 » et « 630 » respectivement. Sur le plan de l'application des règles, ces deux dernières erreurs se référaient à un niveau développemental plus avancé. Elles montraient que ce sujet a acquis une nouvelle connaissance qui lui a permis de placer « 10 » ou « 30 » dans la case vide créée déjà après « 6 » par la règle Pb et non pas remplir la case par zéro. Pourtant il ne disposait toujours pas de la règle appropriée (Pc) pour transcoder ce nombre.

Sujet 20

Cet enfant n'avait produit aucune non-réponse durant toutes les passations. Il a commencé par produire 33% d'erreurs pour régresser ensuite en produisant 45% d'erreurs à la deuxième passation mais lors de la troisième passation sa performance s'était améliorée puisque le pourcentage d'erreurs n'était plus que de 12% (Annexe 6).

Tableau 2.4.12 : réponses données sur les nombres complexes

nbr	70	73	78	79	80	90	91	95	97
P1	610	613	68	6	420	410	411	415	47
P2	6010	6013	6018	6019		8010	8011	8015	817
P3	71			99		80	81		87

Nombres complexes fixes pendant les trois passations. La case vide indique une réponse correcte

L'analyse de ses erreurs montrait qu'à la première passation ce sujet ne produisait aucune erreur sur les structures simples, c'est-à-dire tous les nombres dictés inférieurs à « 70 ». Les erreurs apparaissaient exclusivement sur tous les nombres supérieurs à « 70 » dictés. Elles indiquaient que cet enfant ne disposait pas encore de la règle appropriée pour transcoder les Dizaines et Dizaines unités complexes, (il écrivait « 411 » pour « quatre-vingt-onze ») (Tableau 2.4.12). Ce comportement indiquait aussi bien que ce sujet connaissant le transcodage des primitives lexicales simples le mobilisait pour transcoder les dizaines-unité complexes, qu'une difficulté à mémoriser temporairement la totalité de la chaîne numérique verbale au moment de la dictée.

En deuxième passation, nous constatons que les erreurs commises par ce sujet révélaient une certaine régression en ce sens qu'il commençait à produire des erreurs de transcodage littéral complet (lexicalisation complète) plus fréquemment sur les dizaines complexes et les dizaines-unités complexes comme écrire « 6010 » pour « soixante-dix ». Curieusement, ce sujet commettait également des erreurs de type « lexicalisation complète » même sur les structures simples qu'il maîtrisait précédemment. Cependant, il progressait dans le transcodage des nombres composés avec « quatre-vingt ». Par exemple le passage d'une lexicalisation du nombre « quatre-vingt-onze » écrit « 411 » à une écriture en « 8011 » où le chiffre 8 apparaissait pour la première fois.

A la troisième passation, ce sujet se débarrassait des erreurs de lexicalisation complète, mais les quelques erreurs restantes, portant sur les structures complexes uniquement, se

transformaient en erreurs lexicales comme écrire « 80 » pour « quatre-vingt-dix ». Ceci signifie qu'il commençait à se rendre compte que « quatre-vingt-dix » correspondait à un nombre en deux chiffres mais, ne disposant pas de la règle requise (Pc) permettant d'ajouter « un » au nombre en chaîne, il commettait cette erreur.

Globalement, les erreurs produites sur les 14 nombres complexes (Dc et DUc) se répartissaient ainsi au cours des trois passations : les erreurs qui consistaient à transcoder ces nombres avec 2 chiffres mais de manière erronée diminuaient entre P1, P2, P3 (respectivement 113, 97 et 72 erreurs) et celles qui consistaient à transcoder les nombres avec 3 chiffres ou plus, étaient en très forte diminution (respectivement 153, 89 et 17 erreurs). Ainsi, les erreurs consistant à écrire un nombre avec deux chiffres - elles étaient moins nombreuses en première passation que celles qui consistaient à écrire un nombre avec 3 chiffres ou plus - devenaient un peu plus nombreuses en deuxième passation pour dominer en troisième. Cette diminution sensible du transcodage à l'aide de 3 chiffres ou plus des nombres complexes, confirme l'idée que les enfants développaient, en fin de CP, une connaissance de type : ces nombres (*e.g.*, « quatre-vingt-treize ») s'écrivent avec 2 chiffres quelle que soit la longueur de la chaîne verbale utilisée à l'oral pour les énoncer. Par exemple, concernant le nombre « quatre-vingt-treize », l'évolution de l'erreur de transcodage était la suivante : « 42013 » (transcription littérale complète) puis « 8013 », puis « 813 » et « 83 ».

Ordre d'acquisition des règles :

D'après l'analyse précédente, nous avons pu remarquer que les enfants avaient intégré une partie essentielle du système de production mais que les nombres complexes (>70) leur posaient encore quelques problèmes. Une partie des règles de transcodage de ces nombres n'est pas encore acquises.

Afin de vérifier dans quel ordre s'est effectuée l'acquisition de certaines règles et l'inférence de celles qui ne le sont pas encore, nous avons procédé au dépouillement des erreurs observées dans le transcodage des nombres dictés. Ceci nous a permis également d'avoir une idée de l'état du système de transcodage à ce stade de développement et de son évolution.

Les deux figures suivantes illustrent l'application des différentes règles de transcodage dans les trois passations. La première illustre les règles appliquées aux structures lexicales simples et la deuxième, celles appliquées aux structures lexicales complexes :

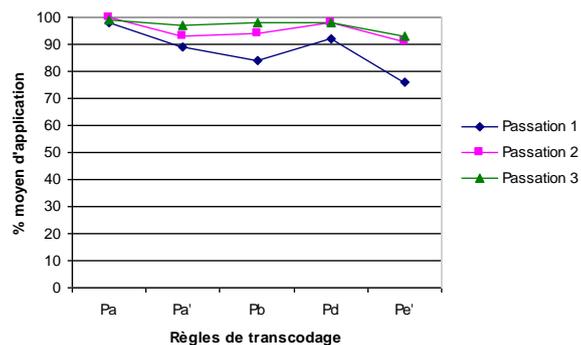


Figure 2.4.8 : Application des différentes règles de transcodage lors des trois passations sur les structures numériques simples

Les structures « simples » (Figure 2.4.8), et dès la première passation, révélèrent une application élevée des règles de transcodages correspondantes (> 75%). La règle Pa était appliquée à presque 100%, viennent ensuite les règles Pd et Pa' qui étaient les deux règles les plus appliquées (environ 90%). Enfin, les deux règles Pb et Pe' donnaient lieu à relativement moins d'application (entre 75 et 85%).

A la deuxième passation, l'ensemble des règles précédentes ont été davantage appliquées à la seule différence que la règle Pb est cette fois ci plus appliquée que la règle Pa'.

Lors de la troisième passation, l'application de l'ensemble de ces règles s'approchait de 100% mais la règle Pe' restait moins appliquée que les autres (93%). En général, l'évolution de l'application des règles est plus perceptible entre les deux premières passations qu'entre les deux dernières.

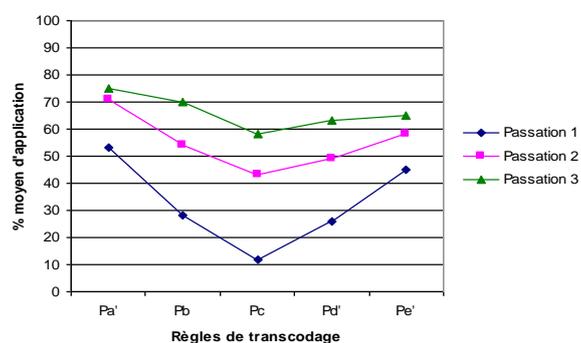


Figure 2.4.9 : Application des différentes règles de transcodage lors des trois passations sur les structures numériques complexes

Quant aux structures complexes (Figure 2.4.9), les règles ne sont pas toutes les mêmes que celles déjà vues dans les structures simples. On a affaire ici à des règles supplémentaires (Pc et Pd'). Lors de la première passation, l'application de la règle Pc était à un niveau très bas (12%). Les règles Pb et Pd' étaient aussi peu appliquées (28% et 26% respectivement). Par contre, les deux autres règles Pa' et Pe' s'approchaient de 50% d'application (53% et 45% respectivement). En deuxième passation, l'application de ces mêmes règles a connu une évolution importante et plus particulièrement de la règle Pc dont le pourcentage d'application s'est élevé à 43%. Cependant, l'application de toutes les autres règles restait supérieure à celle de Pc. Enfin, lors de la troisième passation, l'application des règles a évolué moins fortement notamment pour Pa' et Pe' dont le pourcentage a atteint 75% et 65% respectivement. L'évolution dans l'application de la règle Pc reste la plus marquante. En effet, elle est passée de 12% à 58 % entre la première et la troisième passation.

Evolution des différents types d'erreurs au cours des passations :

Comme nous l'avons fait avec les enfants de GS nous présentons dans le Tableau 2.4.13 ci-après les erreurs classées dans chacune des trois passations pour les enfants de CP.

Tableau 2.4.13 : Pourcentage des types erreurs classées à chaque passation en CP

	Passations		
	P1	P2	P3
Nombre total d'erreurs sans les non-réponses	361	228	126
Nombres d'erreurs classées	355	224	118
% d'erreurs classées	98 %	98%	94%

Cette opération nous a permis d'obtenir des pourcentages assez élevés d'erreurs classées dans les trois passations (98%, 98% et 94% respectivement). Ces erreurs classées ont été ensuite réparties selon leur nature lexicale ou syntaxique. La figure 2.4.10 suivante illustre leur évolution au cours des trois passations.

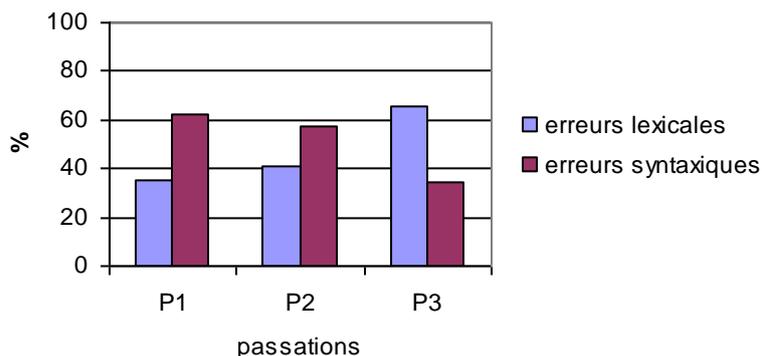


Figure 2.4.10: Evolution des erreurs lexicales et syntaxiques pour les trois passations en CP

Globalement, les enfants de CP commettaient plus d'erreurs syntaxiques (391 erreurs) que lexicales (295 erreurs) (Figure 2.4.10). Les erreurs syntaxiques étaient plus fréquentes dans les deux premières passations alors que les erreurs lexicales dominaient dans la troisième passation.

A l'analyse de ces erreurs (Figure 2.4.11) nous observons, que dans les erreurs lexicales, l'erreur de pile était le type d'erreur le plus retrouvé. Celui-ci augmentait également d'une passation à l'autre (28%, 29 % et 48% respectivement). Les autres types d'erreurs lexicales (« substitution » et « erreur de position dans la pile ») étaient relativement faibles et augmentaient aussi mais très légèrement d'une passation à l'autre. L'erreur d'inversion était très faible (1%) et ne se produisait que dans la première et la deuxième passation.

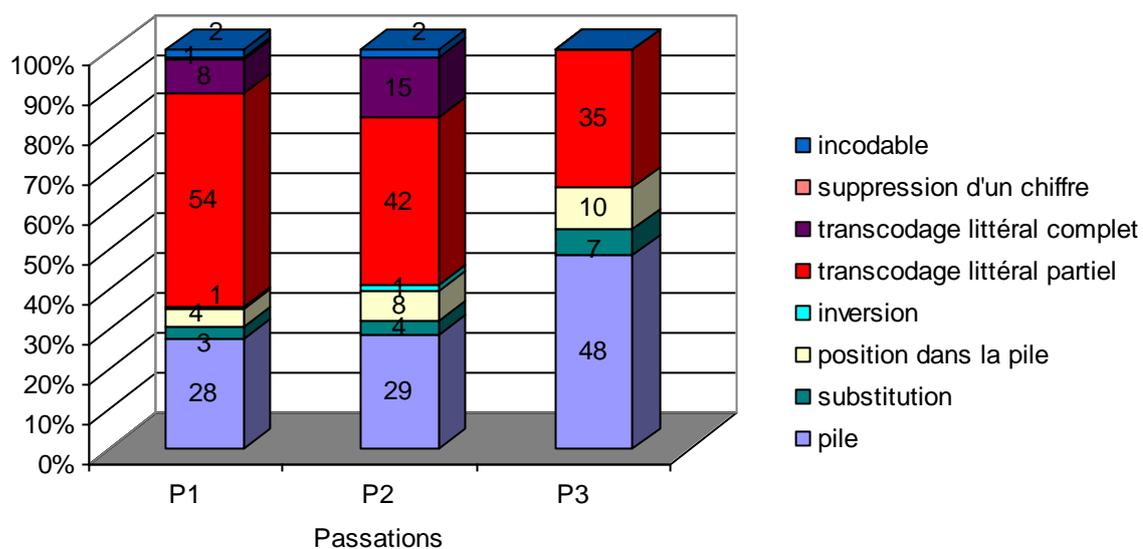


Figure 2.4.11: Répartition des différents types d'erreurs lexicales et syntaxiques pour les trois passations en CP

Quant aux erreurs syntaxiques, le transcodage littéral partiel était le plus fréquent. Ce type d'erreurs diminuait d'une passation à l'autre (54%, 42% et 35% respectivement). Cependant, le transcodage littéral complet n'était observé qu'à la première et la deuxième passation (8% et 15% respectivement) pour disparaître après. L'erreur de suppression était très rare et se produisait uniquement à la première passation (1%).

Par la suite, les différents types d'erreurs décrits précédemment ont été répartis sur les sept catégories lexicales des nombres. Cette répartition est présentée dans le Tableau 2.4.14 suivant :

Tableau 2.4.14: Répartition de différents types d'erreurs sur les sept catégories lexicales pour les trois passations en CP

	Erreurs de pile			Substitution			Position dans la pile			Inversion D/U			Littéral partiel			Littéral complet			Suppression un chiffre		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
U																					
P	43	29	67	14			29	29	33	14	43										
dix-u	57					100							43								
Ds	64		100	18	18								0								
Dc					11		11	13	39				66	55	61	18	16				
DUs	78	36	29			43	5	14					5		29	12	50				
DUc	20	32	56	2	1	3	1	5	4				69	47	37	7	14		1		

N.B : Les résultats sont indiqués en pourcentage, la case vide indique 0%

L'analyse des types d'erreurs lexicales et syntaxiques révélait qu'aucune erreur n'avait été produite sur les unités. Par contre, sur les « Particuliers » les erreurs produites étaient exclusivement lexicales. Celles-ci étaient en majorité de type erreur de pile et augmentaient entre la première et la troisième passation (43%, 29%, 67% respectivement). Un exemple de cette erreur était d'écrire « 40 » pour « quatorze ». Les erreurs de position dans la pile étaient moins fréquentes et augmentaient légèrement entre la première et la troisième passation (29%, 29%, 33% respectivement). Les erreurs de substitution apparaissaient uniquement en première passation (14%) puis disparaissaient complètement, alors que les erreurs d'inversion étaient plutôt irrégulières puisque de 14% en première passation, elles augmentaient jusqu'à 43% en deuxième passation pour disparaître totalement à la troisième passation.

Par ailleurs, les erreurs produites sur les « Dix-unité » étaient en première passation d'ordre à la fois lexicales et syntaxiques. Plus précisément ces erreurs étaient de type « erreur de pile » (57%) et de type « littéral partiel » (43%). Aucune erreur ne s'observait, par contre en

deuxième passation. A la troisième passation, les erreurs devenaient uniquement de type « erreur de substitution ».

Dans la classe des « Dizaines simples » toutes les erreurs observées étaient de type « erreur lexicale ». Elles se répartissaient entre les erreurs de pile ou de substitution. Les erreurs de pile, assez élevées, étaient produites à 64% en première passation et à 100% en troisième passation tandis que les erreurs de substitution n'apparaissaient que faiblement aux deux premières passations puis disparaissaient complètement en troisième passation (18%, 18% et 0 respectivement).

Lorsque l'on passe aux « Dizaines complexes », les erreurs devenaient essentiellement syntaxiques. En majorité, elles étaient de type littéral partiel, élevées en première et troisième passations (66% et 61% respectivement) et même si elles restaient élevées en deuxième passation, elles baissaient légèrement (55%). Les erreurs de type « littéral complet » étaient par contre, moins nombreuses et ne se produisaient qu'aux deux premières passations (18%, 16% et 0% respectivement). Les erreurs lexicales étaient relativement moins nombreuses et essentiellement de type « position dans la pile ». Cette erreur augmentait sensiblement entre la première et la troisième passation (11%, 13% et 39% respectivement). Par ailleurs, quelques erreurs peu fréquentes étaient de type « substitution ». Ces erreurs n'étaient observées qu'à la deuxième passation (11%).

Les erreurs sur les structures « Dizaines-unités simples », quant à elles, étaient en majorité lexicales et notamment de type « erreur de pile ». Ces dernières étaient très élevées en première passation (78%), puis diminuaient fortement en deuxième passation (36%) et légèrement après (29%). Par ailleurs, les erreurs de substitution n'étaient observables qu'à la troisième passation (43%). En outre, peu d'erreurs de type position dans la pile étaient observées lors de la première et la deuxième passation (5%, 14% respectivement). Dans les erreurs syntaxiques, l'erreur la plus produite était plus de type « littéral complet » que « littéral partiel ». Les erreurs de type « littéral complet » étaient plus élevées en deuxième passation (50%) et leur augmentation était plus forte entre les deux premières passations (12% et 50%). Ce type d'erreur disparaissait ensuite. Par contre, peu d'erreurs de type « littéral partiel » avaient été produites. Celles-ci, très faibles à la première passation, disparaissaient à la deuxième passation mais reprenaient leur augmentation de façon remarquable après (5%, 0% et 29% respectivement).

Contrairement aux « DUs », les erreurs produites sur les « Dizaines-unités complexes » étaient plutôt syntaxiques et notamment de type « littéral partiel ». Ces dernières, élevées en première passation (69%) diminuaient ensuite de façon sensible (47% puis 37% aux deux passations suivantes). Par contre, les erreurs de type « littéral complet » étaient moins fréquentes et augmentaient entre la première et la deuxième passation pour disparaître à la troisième (7%, 14% et 0% respectivement). Les erreurs de suppression apparaissaient seulement sur cette catégorie mais très rarement (1%) et uniquement à la première passation. Quant aux erreurs lexicales, elles étaient en grande majorité des erreurs de pile et augmentaient sensiblement d'une passation à l'autre (20%, 32% et 56% respectivement) alors que peu d'erreurs de type « position dans la pile » ou « substitution » apparaissaient et présentaient plutôt un caractère fluctuant.

Discussion

La présente étude s'inscrit dans la suite de l'étude développementale effectuée par les auteurs d'ADAPT (2004) qui a porté sur des enfants âgés de 8-9 ans. Elle prolonge aussi notre première étude sur les enfants de CP (partie 2.3) qui nous a permis de recueillir des données empiriques sur le transcodage des nombres chez des enfants âgés de 6-7 ans. Pour ce faire, nous avons utilisé la version ADAPT_{BASIC} comme cadre théorique permettant d'une part d'expliquer le processus de transcodage des nombres jusqu'à 99 et, d'autre part, de comprendre comment évolue le transcodage numérique de la forme verbale du nombre dans sa forme en chiffres au cours du développement. Par ailleurs, notre étude est la première à suivre le développement des capacités de transcodage chez des jeunes enfants de 5 à 7 ans au niveau préscolaire et au début du cours préparatoire.

Le modèle ADAPT sur lequel nous nous sommes fondés, à la différence des autres modèles précédents de transcodage numérique, est un modèle développemental qui rend possible la compréhension du développement de l'activité de transcodage. Il attribue ce développement à deux processus majeurs : la création de nouvelles procédures et l'évolution du lexique en mémoire à long-terme. Selon ce modèle, le transcodage des nombres est décrit comme un processus d'apprentissage menant, avec le développement, à un système utilisant un lexique croissant dépassant la limite de quelques primitives lexicales. Ainsi, et avec l'apprentissage, même des jeunes enfants devraient utiliser un processus de récupération directe en mémoire

pour transcoder des nombres ou même des parties de ces nombres auxquels ils sont souvent confrontés. Ainsi, l'objectif de notre étude était de tester les prédictions de l'ADAPT_{BASIC}. Nous avons donc prédit une amélioration des performances des enfants de chaque groupe d'âge aussi bien au cours des trois passations qu'au cours de la période de développement allant de la classe GS à la classe de CP.

L'ensemble de nos résultats était en accord avec les prédictions du modèle ADAPT_{BASIC}. Ainsi, les enfants de chaque groupe produisaient significativement moins d'erreurs au cours des trois passations et les enfants de CP produisaient significativement moins d'erreurs que les enfants de GS. Cependant, nous nous apercevons que sur les nombres dictés communs aux deux groupes, l'amélioration des performances de transcodage du groupe de CP cessait d'être significative entre la deuxième et la troisième passation, ceci étant dû à un effet plafond, ces nombres devenant faciles à transcoder pour les enfants de ce groupe.

Par ailleurs, la dispersion des sujets, plus grande chez les GS que chez les CP, correspondait à des différences individuelles importantes entre les enfants de GS qui sont probablement dues à l'influence de leur environnement familial puisque à ce stade ils n'avaient pas encore reçu un enseignement systématique des nombres. Par contre, les différences individuelles, moins importantes chez les CP, montraient un apprentissage meilleur dû à l'enseignement systématique effectué pendant le cours préparatoire.

Les résultats indiquaient aussi que, d'une passation à l'autre, les enfants de GS apprenaient de plus en plus des nombres « unités » pour arriver en grande majorité (plus de 80%) à transcoder correctement tous ces nombres ainsi que le nombre « dix » en troisième passation. Les nombres supérieurs à 10 (jusqu'à 29) posaient encore des difficultés qui diminuaient au cours des passations mais restaient tout de même importantes. Ces nombres difficiles à transcoder pour les GS ne l'étaient plus pour les CP. Cela signifiait, conformément aux prédictions du modèle ADAPT, que le lexique croissait et que de nouvelles unités représentationnelles étaient stockées en mémoire à long-terme. Selon ADAPT_{BASIC} au début d'apprentissage ces connaissances en MLT associent chaque primitive à sa catégorie ou classe lexicale.

Concernant la création de procédures, ADAPT suppose qu'une procédure est créée en compilant le calcul de l'analogie et en remplaçant donc les valeurs spécifiques des nombres

par des variables (processus de généralisation). Pour transcoder les nombres supérieurs à 10 la majorité des enfants GS produisaient, en première passation, soit des non-réponses soit des réponses tronquées qui consistaient à transcoder une partie du nombre comme écrire « 2 » pour « vingt-deux » ou « 5 » pour « vingt-cinq », tandis qu'en deuxième et troisième passations, l'erreur la plus fréquente sur « vingt-cinq » (11% des enfants) par exemple était d'écrire « 15 ». Ceci montrait que les enfants avaient acquis quand même une nouvelle connaissance qui leur avait permis de comprendre que « vingt-cinq » était un nombre composé de deux chiffres. Cependant, puisqu'ils ne savaient pas encore transcoder « vingt », ils continuaient à récupérer la valeur positionnelle de « dix » en dizaine et plaçaient donc « 1_ » en chaîne. Ces erreurs observées chez les GS sur les « DUs » étaient observées aussi chez les CP à la première passation mais très peu par la suite.

En ce qui concerne les différentes catégories lexicales des nombres, les résultats obtenus confirmaient nos prédictions : la performance des enfants de GS différait de celle des enfants de CP sur les catégories lexicales communes entre ces deux groupes d'âge (U, P, dix-U, Ds, DUs). Cette différence n'était pas seulement dans la quantité d'erreurs produites mais aussi dans sa nature qui indiquait l'état de leur système de transcodage à un moment donné. Pour les enfants de GS, la performance de transcodage sur la catégorie « unités » était significativement meilleure à celle des autres catégories. De plus, le transcodage des « DUs » était significativement plus difficile que celui des « Ds », ce qui n'était pas le cas chez les élèves de CP où l'on n'observait pas de différence significative entre les Dizaines-simples « Ds » et les Dizaines-unités simples « DUs » et également entre les Dizaines complexes « Dc » et les Dizaines unités complexes « DUc ». Ce qui indique qu'un traitement différent de ces catégories était effectué par les enfants des deux groupes GS et CP. Ceci est explicable par le modèle ADAPT. Le modèle suppose qu'avant tout apprentissage systématique, le découpage de la chaîne numérique verbale d'un nombre résulte en l'identification des primitives lexicales. Dans la langue française ces primitives sont les unités de « un » à « neuf », les particuliers de « onze » à « seize », les dizaines « dix », « vingt » jusqu'à « quatre-vingt-dix » ainsi que les séparateurs « cent » et « mille » qui ne sont pas concernés par la présente étude. Ensuite, et au début de l'apprentissage, les règles d'ADAPT_{BASIC} assignent chaque primitive à sa catégorie ou classe lexicale. Cependant, comme le suggère le modèle PARSER (Perruchet & Vinter 1998), certains groupes de primitives lexicales qui sont fréquemment perçues en succession temporelle immédiate forment des unités représentationnelles qui vont guider à leur tour le processus de découpage (parsing). Ainsi, les

enfants de GS qui sont au tout début de leur apprentissage des nombres stockent progressivement des unités représentationnelles et acquièrent les règles de transcodage décrites par ADAPT_{BASIC}. À ce stade de leur développement, les GS n'avaient pas encore stocké en mémoire à long-terme les « DUs » comme des unités représentationnelles pouvant être récupérées directement, mais ces dizaines unités simples donnaient encore lieu à un transcodage algorithmique passant par l'application de règles, donc sujettes à la production de taux d'erreurs élevés. D'ailleurs, l'analyse de la nature des erreurs constatées sur les Ds montrait que celles-ci étaient exclusivement de nature lexicale, alors que sur les DUs, des erreurs de nature syntaxique apparaissaient également. A l'inverse, pour les enfants de CP qui ont reçu un enseignement systématique, ces formes fréquentes (DUs) ont été stockées en mémoire à long-terme comme des unités représentationnelles qui permettaient donc une récupération directe en mémoire de leur forme plutôt qu'un transcodage algorithmique. Ainsi nous n'avons pas constaté une différence significative chez ces enfants transcodant les Ds et les DUs. Cette absence de différence significative était également observée entre les Dizaines complexes et les Dizaines unités complexes. Cependant, ces structures complexes donnaient lieu à un taux d'erreurs bien élevé comparativement aux Dizaines simples et Dizaines-unités simples. Ceci signifie que les enfants de ce groupe atteignaient leur niveau maximum sur ces structures complexes. D'ailleurs, leurs erreurs sur les dizaines simples et les dizaines unités simples étaient essentiellement de nature lexicale, comme écrire par exemple « 13 » pour « trente » et « 18 » pour « vingt-huit », tandis que sur les Dizaines complexes et les Dizaines-unités complexes leurs erreurs étaient en majorité syntaxiques comme écrire par exemple « 610 » pour « soixante-dix » et « 411 » pour « quatre-vingt-onze ». Cette difficulté à transcoder les Dizaines complexes et les Dizaines-unités complexes a été soulignée aussi dans notre première étude auprès d'enfants de CP ainsi que dans les études de Seron et Fayol (1994) et Jarlegan, & Fayol et Barrouillet (1996) auprès d'enfants français scolarisés en CE1, c'est-à-dire plus âgés que ceux de notre échantillon et ayant déjà appris tous les nombres inférieurs à 100. Les difficultés de transcodage de ces structures complexes persistaient et posaient problème même plus tardivement.

ADAPT a décrit l'évolution au cours du temps des performances de transcodage numérique comme un processus d'apprentissage débutant par l'acquisition et l'application de certaines règles simples qui seront au fur et à mesure du fonctionnement du modèle remplacées par d'autres, plus élaborés.

D'après nos résultats, les enfants de GS ont réussi de plus en plus à transcoder les nombres « unités » au cours des différentes passations. Selon ADAPT_{BASIC} pour transcoder les nombres « unités » une règle Pa est requise pour assigner la primitive lexicale à sa catégorie lexicale correspondant (ici la classe de l'unité). Ainsi, la première procédure créée en GS était Pa qui est la règle requise pour transcoder les nombres « unités » qui constituent les nombres de base du système numérique arabe. Cette règle était appliquée par plus de 80% des enfants dès la deuxième passation, tandis que les autres règles (Pa' requise pour transcoder les unités conditionnées par la présence d'une case vide à remplir, Pb pour transcoder les Dizaines, Pd pour transcoder les Particuliers, et Pe' responsable du remplissage de la case vide par zéro en fin de chaîne) restaient moins appliquées que Pa au cours des trois passations (entre 50% et 70% environs). Ainsi, l'ordre d'acquisition des règles en GS était : Pa, Pd, Pe', Pb et Pa', sauf dans la troisième passation où Pe' s'appliquait un petit peu plus que Pd.

En CP, et sur les mêmes catégories lexicales, toutes les règles citées précédemment donnaient lieu à un pourcentage d'application élevé (supérieur à 75% dès la première passation) et étaient donc acquises à la fin des passations. Leur ordre d'acquisition (Pa, Pd, Pb, Pa' et Pe') était à peu près le même que celui en GS (mais à la différence près que la règle Pe' était moins appliquée par rapport aux autres et ceci dans les trois passations). Sur les Dizaines simples (10, 20,...,60) où la règle Pe' était exigée, les enfants de CP produisaient des erreurs de pile où ils trouvaient la valeur positionnelle correcte du nombre mais pas sa catégorie lexicale. Ils échouaient donc à appliquer la règle Pe' et à remplir la case vide par zéro. Le plus grand nombre de ces erreurs était dû à la ressemblance phonologique comme par exemple écrire « 13 » pour « trente » ou « 14 » pour « quarante ». Ainsi, comme nous l'avons vu, l'efficacité du système de transcodage augmentait aussi bien au cours des différentes passations qu'entre les deux d'âges, GS et CP. Nous constatons aussi qu'avec le développement et l'apprentissage, les groupes de primitives apprises initialement et aperçues fréquemment comme les Dix-unités et les DUs ont été traitées comme des unités par le parsing et leur transcodage a donc nécessité une récupération directe en mémoire de leur forme correspondant en chiffres au lieu de l'application de règles.

Comme pour les structures simples, ADAPT suppose qu'avec le développement, même les groupes de primitives comme « quatre-vingt », « soixante-dix » et « quatre-vingt-dix » qui sont fréquemment perçues en succession temporelle seraient stockées en MLT comme des unités isolées par le processus de parsing et nécessitant un processus de récupération en mémoire de leur forme en chiffres au lieu que leur transcodage ne passe par l'application des

règles. Par conséquent, l'application d'une règle comme Pc par exemple qui est la règle requise pour transcoder « dix » dans un nombre dizaine complexe ne sera plus demandée.

Pour les structures numériques complexes, c'est-à-dire les Dizaines-complexes et les Dizaines-unités complexes, les règles requises ne sont pas toutes les mêmes que celles exigées pour les structures simples. Ainsi, en sus des règles Pa', Pb, Pe', deux règles spécifiques à ces structures complexes sont nécessaires : Pc (qui est la règle exigée pour transcoder « dix » au sein de deux dizaines complexes : « soixante-dix » et « quatre-vingt-dix ») et Pd' (pour le transcodage des nombres Particuliers au sein des Dizaines-unités complexes comme « soixante-onze » ou « quatre-vingt-treize »). Ces deux règles ont comme fonction commune d'ajouter 1 au nombre en chaîne. Selon nos résultats, les pourcentages d'erreurs sur les structures complexes étaient très élevés et les règles requises pour leur transcodage donnaient lieu à un pourcentage faible d'application (allant de 10% en première passation à 60% en dernière), ce qui veut dire qu'elles n'étaient pas encore acquises. Ceci permet d'expliquer les erreurs produites par les enfants sur ces structures complexes comme écrire « 613 » pour « soixante-treize » par exemple. Pourtant, nous avons pu suivre l'évolution de ce type d'erreur au cours des différentes passations. Par exemple, nous avons vu que 88% des enfants de CP produisaient des erreurs en transcodant le nombre « soixante-dix ». Lors de la première passation, ces erreurs consistaient à écrire « 6010 » ou « 610 ». Cette dernière erreur était la plus fréquente (20%), sachant qu'elle illustre un état plus développé du système de transcodage qu'une erreur comme « 6010 » qui correspond à un transcodage littéral complet. L'erreur « 610 » montre qu'il y a une connaissance qui s'ajoute et qui amène à créer une case vide (deuxième action de la règle Pb) et à remplir cette case vide engendrée par la règle Pb par l'entrée suivante. Cependant, la syntaxe du nombre n'est toujours pas connue et la règle Pc responsable de l'ajout de 1 au nombre en chaîne « 6 » n'est pas acquise.

En deuxième passation, les enfants produisaient moins d'erreurs sur ce nombre (63%) mais l'erreur « 610 » restait l'erreur la plus fréquemment produite (10%). En troisième passation, la nature des erreurs produites sur tous les nombres complexes changeait et la majorité des enfants donnaient des réponses qui correspondaient à des nombres à deux chiffres donc en respectant la syntaxe du nombre. Pour « soixante-dix », les erreurs devenaient moins fréquentes (35%) et l'erreur principale était « 61 ». Cette erreur reflétait un niveau du système de transcodage plus avancé que dans l'erreur précédente « 610 », car en écrivant « 61 », les enfants étaient conscients de la syntaxe du nombre, ils savaient donc au moins que c'était un nombre à deux chiffres. Ils appliquaient la règle Pb pour récupérer la valeur positionnelles du

chiffre de dizaine donc (6) et plaçaient une case vide, ensuite ils réappliquaient la même règle Pb pour transcoder « dix » puisqu'ils ne disposaient toujours pas de la règle appropriée Pc. Cela amenait à récupérer la valeur positionnelle de « dix » donc (1) et la placer en case créée précédemment. L'enfant s'arrêtait à cette étape là puisque il savait qu'il ne fallait pas écrire plus de deux chiffres.

En résumé, on peut dire que les enfants de CP n'ont pas encore acquis les règles de transcodage concernant les dizaines complexes et dizaines unités complexes. Ces nombres ne sont pas non-plus perçus comme des unités qui peuvent être traitées par un processus de récupération directe en mémoire à long-terme de leur forme en chiffres. Ceci diminue l'efficacité du système de transcodage sur ces structures et conduit à un pourcentage d'erreurs élevé.

Concernant la nature des erreurs, nous avons remarqué que les erreurs produites par les enfants de GS étaient en majorité lexicales et augmentaient légèrement d'une passation à l'autre. Ceci montrait que ces enfants étaient encore dans la phase des connaissances déclaratives (valeurs spécifiques) qu'ils n'avaient pas encore transformées en variables (procédures) par un processus de compilation s'appuyant sur des analogies comme le suppose le modèle ACT-R d'Anderson (1993) repris par le modèle ADAPT. Ainsi, certains enfants transcodaient correctement un nombre Dizaine-unité comme « 25 » alors que pour « 20 » ils fournissaient soit des réponses erronées soit des non-réponses. Ceci montre que la forme en chiffre (« 25 » par exemple) était mémorisée sans réel apprentissage de la structure syntaxique de ce nombre. Leurs erreurs pourraient provenir d'un échec de récupération en mémoire de certaines formes mémorisées.

Par contre, les erreurs des enfants de CP étaient en majorité de nature syntaxique. Celles-ci se retrouvaient surtout sur les structures complexes pour lesquelles ils n'avaient pas encore acquis les règles appropriées. Les types d'erreurs constatées sur ces structures complexes montraient que les enfants disposaient quand même des règles qui étaient utilisées pour transcoder des structures plus simples et qu'ils essayaient par analogies de se débrouiller avec pour transcoder les structures les plus complexes.

Conclusion :

La présente étude avait pour but de prolonger l'étude développementale réalisée dans le cadre de la validation de l'ADAPT (Barrouillet *et al.*, 2004) en recueillant des données qui permettent de suivre l'acquisition de processus de transcodage chez des enfants plus jeunes âgés de 5 à 7 ans et de tester la version ADAPT_{BASIC} concernant le transcodage des nombres jusqu'à 99. Les résultats nous ont permis de montrer que le modèle ADAPT rend bien compte des performances des enfants lors de leur apprentissage au cours de développement et soutiennent les conclusions de l'étude développementale d'ADAPT sur des enfants plus âgés. Comme nous l'avons vu, le système de transcodage s'installe progressivement chez les enfants de GS. Ces derniers sont en train d'acquérir une partie du lexique numérique mais les correspondances entre les formes numériques verbales et celles en chiffres arabes ne sont pas encore mises en place. Par contre, les enfants de CP ont intégré une partie importante de ce système. Cependant, les irrégularités de dénomination verbale des nombres complexes qui ne sont pas transparents perturbent encore l'accès aux informations concernant la classe lexicale et retardent l'acquisition de ces structures complexes.

2.5. Conclusion générale de la partie développementale

Les études antérieures du transcodage des nombres ont donné une première description des erreurs produites par les enfants à partir de l'âge de 7 ans, en catégorisant ces erreurs comme lexicales et syntaxiques. Cependant, ces études se sont appuyées sur les modèles développés en neuropsychologie de l'adulte pour analyser les performances des enfants, pourtant ces modèles ne réfèrent pas aux mécanismes d'acquisition des processus de transcodage.

Notre étude développementale est la première à évaluer le transcodage chez des jeunes enfants de 6 ans. Les enfants de cet âge sont en tout début d'apprentissage scolaire et en début donc de l'acquisition des règles de transcodage des nombres. Elle est également la première à utiliser le nouveau modèle de transcodage numérique (ADAPT), notamment sa version ADAPT_{BASIC} concernant le transcodage des premiers nombres (de 1 à 99), pour analyser la performance des enfants et suivre leur acquisition du système de transcodage. Nos résultats ont montré que ce modèle est capable de rendre compte du transcodage et son acquisition chez ces enfants dans le système de numération français. Toutefois, vu la diversité des langues, un modèle de transcodage (de verbal en chiffres) pour être généralement valide, doit être capable d'expliquer le transcodage dans des systèmes numériques verbaux des langues différents. D'où est l'intérêt de notre étude inter-linguistique suivante.

3

**APPROCHE
INTER-LINGUISTIQUE**

3. étude comparative de transcodage chez des enfants de Cours

Préparatoire français, Allemands et Syriens

« Approche inter-linguistique »

Introduction:

Nous avons étudié l'apprentissage de la numération dans le système numérique français de France (partie 2.3) et nous avons tenté d'expliquer les difficultés liées à son apprentissage en nous référant au modèle « ADAPT » (Barrouillet *et al*, 2004). Nous allons nous intéresser, dans cette étude, aux apprentissages numériques dans les cultures allemande et syrienne. Leurs systèmes numériques utilisent un sens d'énonciation différent du français et peut être associé (pour le syrien) à un sens d'écriture inverse du système français. Nous chercherons les effets de ces différences sur les apprentissages et nous les comparerons aux apprentissages dans le système français de France.

Dans la numération en français de France, le sens de transcodage se fait dans le sens d'énonciation. Par exemple, lorsqu'on écrit le nombre « trois cent soixante-deux », on commence le codage du nombre par la gauche en écrivant le chiffre correspondant au premier nombre entendu, « 3 », puis ajoute « 6 » qui marque le chiffre des dizaines à droite du précédent et enfin, on termine par le chiffre « 2 » (« 362 ») à droite des chiffres précédemment écrits. La difficulté rencontrée dans la numération française vient de la complexité d'énonciation de certains nombres (dénommés « nombres complexes » *cf. supra*). En allemand, le sens d'énonciation varie selon la taille des nombres. Il se fait dans le sens inverse du sens d'écriture pour les nombres de deux chiffres et alterne pour les nombres de trois chiffres. Par exemple, le nombre « quarante-sept » se dit « siebenundvierzig » ce qui s'exprimerait en anglais par « seven and forty »¹⁷. Ce sens d'énonciation est contraire au sens d'écriture puisque l'écriture se fait de gauche vers la droite dans les systèmes européens. Cette

¹⁷ Nous utiliserons la langue anglaise comme langue de référence pour traduire mot à mot la façon dont chaque nombre s'énonce afin de ne pas créer d'ambiguïté avec les langues étudiées. Idem pour le tableau 2.

inversion du sens d'énonciation existe dans d'autres langues comme l'arabe¹⁸. Nous étudions ici l'exemple du système numérique arabe syrien. Ce système ressemble au système allemand avec toutefois, une différence notable : le sens d'écriture se fait de gauche vers la droite en allemand et de droite vers la gauche en arabe (les signes adoptés par la Syrie pour représenter les chiffres sont les signes indiens ; *cf. infra*). Nous allons expliquer en détail la structure numérale de chaque système (français, allemand et syrien) puis nous pointerons les éléments susceptibles d'influencer les acquisitions de la numération dans chaque système. Nous nous référerons également au système numéral des pays d'Asie du sud-est (*e.g.*, Chine, Corée, Japon...) qui est complètement transparent.

Le système numérique français.

Ce système a été étudié en détail dans la partie 2. Ce qui le caractérise est la complexité de l'énonciation des nombres de soixante-dix à quatre-vingt-dix neuf (*cf. supra*). Ces différences concernent la numération en français de France, d'autres pays francophones ayant adopté des mots différents pour évoquer ces dizaines complexes. Les Belges et les Suisses francophones utilisent les termes « septante et nonante » pour dénommer les nombres « 70 » et « 90 » à la place des combinaisons de primitives lexicales (soixante-dix et quatre-vingt-dix) employées en français de France. Concernant « 80 », ce nombre se lit « quatre-vingt » en Belgique et peut se lire selon les cantons Suisses, « quatre-vingt » (canton de Genève) ou « huitante » (cantons de Vaud, de Fribourg et du Valais). Cette irrégularité de dénomination verbale en France à partir du nombre 70, constitue une réelle difficulté et défavorise les enfants Français par rapport à leurs pairs Belges ou Suisses sur le plan des apprentissages de la numération. La plupart des erreurs sont dues à cette complexité (Fayol, 1990 ; Seron & Fayol, 1994 ; Fayol, Camos & Roussel, 2000 ; *cf. supra* partie 2).

Le système numérique allemand

Le système numérique allemand a la particularité, par rapport au système français et anglais d'inverser l'ordre d'énonciation de certains nombres. L'énonciation des nombres 11 « elf » et 12 « zwölf » ressemble à celle de l'anglais où on n'entend pas la valeur « dizaine » ; ils sont opaques par rapport aux chiffres des dizaines et des unités qu'ils représentent mais la suite des nombres de 13 jusqu'à 19 devient plus transparente. Par exemple, « 14 » sera énoncé

¹⁸ L'inversion d'ordre d'énonciation qui affecte ces nombres est une propriété qui existe dans plusieurs langues comme l'allemand, le malgache, le néerlandais, le danois, le maltais, etc.

« vierzehn » en allemand (« four-ten » littéralement en anglais, tableau 3). Une source de difficulté ici pourrait être l'ordre d'énonciation des dizaines et des unités, car l'ordre d'énonciation des primitives est inversé et contredit le sens de l'écriture ($G \rightarrow D$). C'est le cas de la plupart des nombres de deux chiffres. Par exemple le nombre « 35 » sera énoncé « funfunddreißig » littéralement comme « five and thirty » ($G \leftarrow D$) et s'écrira de la gauche vers la droite.

Pour les grands nombres et à la différence de système numérique verbal français, l'ordre d'énonciation des primitives lexicales n'est pas consistant avec l'ordre écrit en chiffres arabes. Considérons le nombre «52 135 » : en français, il sera énoncé « cinquante-deux mille cent trente-cinq » (toutes les primitives lexicales sont énoncées dans le sens d'écriture de gauche à droite). En allemand, ce nombre se lira (zwei**und**fünfzig tausend hundert fünf**und**dreißig) littéralement « two and fifty thousand hundred five and thirty ». Ainsi, l'ordre d'énonciation contredit parfois le sens d'écriture ($G \leftarrow D$, $G \rightarrow D$, $G \leftarrow D$). Le scripteur doit réorganiser mentalement l'ordre des chiffres afin de parvenir à une écriture correcte. Ce n'est pas le cas pour tous les nombres ; pour « 100 » et « 1000 » et certains nombres composés d'une centaine et de dizaines (*e.g.*, 140) le sens de l'énonciation correspond au sens d'écriture général (*e.g.*, « 140 » se dit « hundertvierzig » en allemand, littéralement « hundred forty »). La transcription commence par cent (« 1 ») et se poursuit par quarante (« 4 » et « 0 ») elle va donc dans le sens de l'écriture de la langue allemande de gauche à droite (Tableau 3.1). Ces changements d'orientation entre sens d'énonciation et sens d'écriture pourraient être source d'erreurs chez les enfants confrontés à leur apprentissage.

Tableau 3.1 : Sens d'énonciation vs sens d'écriture des nombres en fonction des langues et des catégories lexicales

	France	Allemagne	Syrie
Sens de l'écriture	---->	---->	<----
Ordre d'énonciation			
Dizaine	---->	---->	---->
Ex :	Trente 30	Trente 30	Trente 30
Dizaine-unité	---->	<----	<----
Ex :	Trente-cinq 35	Cinq et trente 35	Cinq et trente 35
Centaines	---->	---->	---->
Ex :	Cent quarante 140	Cent quarante 140	Cent et quarante 140

Le système numérique Syrien

En arabe, l'écriture des mots et des lettres se fait de droite vers la gauche. Les nombres, écrits en caractères indiens en Syrie (cf. tableau 3.2), sont disposés de la même manière que les nombres arabes utilisés en Europe.

Tableau 3.2: Les chiffres de 0 à 9 utilisés en Syrie

Indien	٩	٨	٧	٦	٥	٤	٣	٢	١	٠
Arabe	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

L'ordre des chiffres est universel (centaines - dizaines - unités de la gauche vers la droite) ; il est donc contraire au sens d'écriture des mots. Le sens d'énonciation peut se faire de la droite vers la gauche ou inversement (cf. *infra*). Le système numérique verbal de la langue arabe ressemble à celui de la langue allemande. Ainsi, pour dire « 24 » en arabe on commence par « quatre » puis on énonce « vingt » (littéralement « four and twenty »). L'énonciation des nombres de « 11 » à « 19 » en arabe diffère un peu des autres nombres DU. Dans l'énonciation de ces nombres, on entend le mot « dix », même pour les nombres « 11 » et « 12 » : par exemple « 11 » se dit « ahada ashar » (littéralement « one-ten ») et « 14 » se dit « arbaa ashar » (littéralement « four-ten », cf. tableau 3). Cependant, cette énonciation pourrait être moins transparente pour « 11 » et « 12 » que pour les autres DU. Prenons par exemple, le nombre « 11 » est énoncé « ahada-ashar » (cf. *supra*) mais « one » en arabe se dit « wahed » et quand ce nombre est composé avec dix (dans le nombre « 11 ») son énonciation diffère un peu et se prononce « ahada- ». Cette énonciation du nombre « 1 » n'est utilisée que dans l'énonciation du nombre « 11 ». A noter également que l'énonciation de « dix » diffère selon son emploi¹⁹ : seul, il se lit « ashara عشرة » et « ashar عشر » dans les nombres de 11 à 19.

¹⁹ En arabe, les nombres s'accordent avec ou contre l'objet qu'ils dénombrent. Quelques exemples : (1) « un » et « deux » s'accordent toujours avec l'objet dénombré et s'énoncent après l'objet (ex : « hadar rajolan **ithnan** » littéralement « a venu hommes **deux** » ; « hadarat talibat **ithnatan** » littéralement « a venu étudiantes **deux** »). (2) Les nombres de « trois » à « neuf » s'accordent toujours contre le genre de l'objet dénombré et s'énoncent avant (ex : « **khamsata** rijal » littéralement « **cinq** (féminin) hommes » ; « **khams** talibat » littéralement « **cinq** (masculin) étudiantes »). (3) le nombre « dix » énoncé seul s'accorde toujours contre le genre de l'objet et s'énonce avant (ex : « **ashara** rijal » littéralement « **dix** (féminin) hommes » ; « **ashar** talibat » littéralement « **dix** (masculin) étudiantes »). (4) les nombres « onze » et « douze » s'accordent toujours avec le genre de l'objet dénombré (ex : « hadar **ahada ashar** talib » littéralement « a venu **onze** étudiants » ; « hadarat **ihada ashara** talibat » littéralement « a venu **onze** étudiantes »). Enfin, (5) pour les nombres de « treize » à « dix-neuf » la première partie s'accorde avec et la deuxième contre le genre de l'objet dénombré (ex : « hadara **thalatha ashar** talib » littéralement « a venu **treize** étudiants » ; « hadara **thalath ashara** taliba » littéralement « a venu **treize** étudiantes ») Cette question linguistique n'a pas d'incidence sur les nombres dictés seuls qui sont toujours au masculin et l'enfant est familiarisé avec ces deux prononciations.

De plus, il peut y avoir une confusion entre « ashar عشر » qui indique « dix عشرة » et « ishreen : عشرين » l'énonciation de « 20 ». Nous pensons par ailleurs que l'absence de « et » entre les unités et les dizaines - qui existe dans l'énonciation des autres DU - peut être une source de difficulté.

L'inversion d'ordre d'énonciation des primitives lexicales qui concerne les nombres DU ne devrait pas poser de problème pour les enfants Syriens puisque cette inversion d'énonciation ne contredit pas le sens d'écriture dans la langue arabe. Par exemple, le nombre « 25 » se dit « khamisa wa ishroon » qui se traduit littéralement par « five and twenty ». On énonce le chiffre des unités puis celui des dizaines, ce qui correspond au sens d'écriture de la langue arabe ($G \leftarrow D$). Ainsi, les enfants Syriens devraient écrire ces nombres DU de droite à gauche (leur sens d'écriture habituel) en commençant par l'unité qu'ils entendent en premier puis en écrivant la dizaine à gauche. Par contre, ils pourraient rencontrer des difficultés dans le transcodage des nombres de dizaines entières (D) ainsi que pour « cent », « mille » et pour les centaines pour lesquelles l'ordre d'énonciation et d'écriture en chiffres contredit le sens d'écriture général de la langue arabe (cf. tableau 3.1). Concernant l'énonciation des nombres entiers de dizaines, on commence toujours par la gauche (le chiffre des dizaines se trouve à gauche, la place de l'unité étant occupée par zéro). Par exemple, dans le nombre 50 « khamsoon » (littéralement « fifty »), « kham- » correspond à « cinq » et est énoncé en premier et le suffixe « -oon » prononcé en second, indique qu'il appartient aux dizaines. L'écriture en chiffres de ce nombre va commencer à gauche par le « 5 » se poursuivre vers la droite par le zéro ($G \rightarrow D$). Ainsi, l'enfant Syrien devra apprendre à laisser un emplacement libre à droite du cinq pour placer le zéro et écrire « 50 ». Ce changement de direction d'écriture pourrait être une source de difficulté et l'amener à commettre des erreurs en transcodant ces nombres. Une des erreurs attendues pourrait être l'inversion du 5 et du 0.

En ce qui concerne le nombre « 20 » en arabe, son énonciation diffère des autres dizaines. Il est énoncé « ishroon : عشرون » ou « ishreen : عشرين ». Ici, on n'entend pas deux (« ithnan ») avant le suffixe « -oon » qui indique la dizaine mais on entend « dix-عشر », suivi par le suffixe « -oon : ون » ou « een : ين » à la fin du mot (ce qui permet de distinguer ce nombre du nombre « dix : عشرة »). L'erreur attendue serait d'écrire une fois « 10 » suivi d'un autre « 10 » ou d'écrire « 10 » suivi par zéro donc « 100 ».

D'autres difficultés se présentent pour ces enfants : à partir du nombre « 100 », l'ordre d'énonciation sera différent selon le nombre. L'ordre d'énonciation se fera temporellement contre le sens d'écriture ($G \rightarrow D$), d'autres fois dans le sens inverse ($G \leftarrow D$). Deux exemples pour illustrer cette difficulté : (1) pour les nombres « centaines seules » tel que « 100 », et les

nombres « centaines et dizaines » tels que « 140 », l'énonciation et l'écriture en chiffres se font toujours dans le même sens. On entend et on écrit « 1 » puis « 4 » puis « 0 ». L'enfant devra donc apprendre à laisser deux cases vides à droite avant d'écrire le 1. (2) pour les nombres composés de cent et d'unités comme « 103 » énoncé littéralement « hundred and three », l'ordre d'énonciation (centaine et unité) s'oppose au sens d'écriture (G ← D). L'enfant devra laisser deux cases vides à droite avant d'écrire le chiffre des centaines (1), puis placer le trois dans la case la plus à droite et enfin le zéro dans l'espace entre le 1 et le 3. On retrouve cette difficulté pour les nombres composés de cent et de Dizaines-unités comme « 127 » énoncé littéralement « hundred and seven and twenty ». L'ordre d'énonciation et sens d'écriture en chiffres alterneront (1 puis 7 puis 2 placé entre 1 et 7). Concernant les nombres de centaines de 300 à 900 on entend les primitives « trois », « quatre », etc. avant « cent » ce qui diffère peu des nombres énoncés précédemment. Le nombre « 200 » a la même particularité que le nombre « 20 » avec une énonciation peu transparente, mais se fait toujours de G → D. Ce nombre (200) est énoncé « miat^{ain} » « مئتين » en arabe où on n'entend pas le « deux- » « ithnan » avant « cent » mais « miat- « littéralement (qui est « cent »), et un suffixe à la fin du mot « -ain » exprimant qu'il y a deux fois « cent » (comme le préfixe bi- en français). L'erreur attendue pourrait être d'écrire deux fois le nombre « cent » (100100).

Nous imaginons alors les difficultés rencontrées pour transcoder un grand nombre comme « 48 129 » énoncé littéralement « eight and fourty thousand and hundred and nine and twenty ». Plusieurs changements de direction d'écriture sont effectués (G ← D, G → D, G ← D), l'écriture de chiffres s'effectuant donc dans l'ordre suivant (8, puis 4 à gauche du 8, puis 1 à droite du 8, espace, puis 9 et enfin 2 placé dans l'espace). Il faut cependant rappeler que l'enseignement des nombres dans la classe de CP en Syrie s'arrête au nombre 99 comme en France, à la différence de l'Allemagne où il va jusqu'à 100.

Le système numérique allemand étant assez semblable au système numérique syrien, il est aisé de comparer l'effet du sens d'écriture sur le transcodage des nombres dans les deux systèmes.

D'autres systèmes ont une structure complètement transparente et reflètent à l'oral la structure du système de base « dix ». C'est le cas des langues asiatiques et en particulier du japonais et du chinois. Par exemple, dans la langue japonaise, le nombre « 38 » est énoncé « san ju hachi » littéralement « three-ten eight ». En chinois le nombre « 20 » (« er shi ») est énoncé

comme « two-ten » et « 21 » (er shi yi) littéralement « two-ten one ». La transcription des nombres en japonais et en chinois ne présente pas de difficulté et favorise davantage l'apprentissage et l'utilisation de la suite verbale et numérale des nombres (*cf.* Fayol, 1990) que d'autres dont la structure est moins transparente comme le sont les systèmes numériques occidentaux.

Tableau 3.3 : les différentes énonciations des nombres dictés en fonction de la langue : Française, Allemande et Arabe (Syrie) traduite littéralement (mot pour mot) en anglais*

Nbr	France	en anglais	Allemagne	en anglais	Syrie	en anglais
2	deux	two	zwei	two	ithnan اثنان	two
4	quatre	four	vier	four	arbaa أربعة	four
5	cinq	five	fünf	five	khamisa خمسة	five
7	sept	seven	sieben	seven	sabaa سبعة	seven
9	neuf	nine	neun	nine	tisaa تسعة	nine
10	dix	ten	zehn	ten	ashara / عشرة	ten
11	onze	eleven	elf	eleven	ahada ashar احد عشر	one-ten
12	douze	twelve	zwölf	twelve	ithna ashar اثنا عشر	two-ten
13	treize	thirteen	dreizehn	three-ten	thalatha ashar ثلاثة عشر	three-ten
14	quatorze	fourteen	vierzehn	four-ten	arbaa ashar أربعة عشر	four-ten
15	quinze	fifteen	fünfzehn	five-ten	khamisa ashar خمسة عشر	five-ten
17	dix-sept	ten-seven	siebzehn	sev-ten	sabaa ashar سبعة عشر	seven-ten
18	dix-huit	ten eight	achtzehn	eight-ten	thamania ashar ثمانية عشر	eight-ten
19	dix-neuf	ten nine	neunzehn	nine-ten	tisaa ashar تسعة عشر	nine-ten
20	vingt	twenty	zwanzig	twenty	ishroon / عشرين / عشرون	dix-oon ou dix-een*
21	vingt et un	twenty and one	einundzwanzig	one and twenty	wahed wa ishroon واحد وعشرون	one and *
22	vingt-deux	twenty two	zweiundzwanzig	two and twenty	ithnan wa ishroon اثنان وعشرون	two and *
23	vingt-trois	twenty three	dreiundzwanzig	three and twenty	thalatha wa ishroon ثلاثة وعشرون	three and *
25	vingt-cinq	twenty five	fünfundzwanzig	five and twenty	khamisa wa ishroon خمسة وعشرون	five and *
27	vingt-sept	twenty seven	siebenundzwanzig	seven and twenty	sabaa wa ishroon سبعة وعشرون	seven and *
30	trente	thirty	dreißig	thirty	thalathoon ثلاثون / ثلاثين	thirty
33	trente-trois	thirty-three	dreiunddreißig	three and thirty	thalatha wa thalathoon ثلاثة وثلاثون	three and thirty
40	quarante	forty	vierzig	forty	arbaoun أربعون / اربعين	forty
47	quarante-sept	forty seven	siebenundvierzig	seven and forty	sabaa wa arbaoun سبعة وأربعون	seven and forty
50	cinquante	fifty	fünfzig	fifty	khamsoon خمسون / خمسين	fifty
52	cinquante-deux	fifty two	zweiundfünfzig	two and fifty	ithnan wa khamsoon اثنان وخمسون	two and fifty
60	soixante	sixty	sechzig	sixty	sittoon ستون / ستين	sixty
68	soixante-huit	sixty-eight	achtundsechzig	eight and sixty	thamania wa sittoon ثمانية وستون	eight and sixty
70	soixante-dix	sixty-ten	siebzig	seventy	saboun سبعون / سبعين	seventy
72	soixante-douze	sixty-twelve	zweiundsiebzig	two and seventy	ithnan wa saboun اثنان وسبعون	two and seventy
73	soixante-treize	sixty-thirteen	dreiundsiebzig	three and seventy	thalatha wa saboun ثلاثة وسبعون	three and seventy
77	soixante-dix-sept	sixty-ten-seven	siebenundsiebzig	seven and seventy	sabaa wa saboun سبعة وسبعون	seven and seventy
78	soixante-dix huit	sixty-ten-eight	achtundsiebzig	eight and seventy	thamania wa saboun ثمانية وسبعون	eight and seventy
79	soixante-dix-neuf	sixty-ten-nine	neunundsiebzig	nine and seventy	tisaa wa saboun تسعة وسبعون	nine and seventy
80	quatre-vingt	four-twenty	achtzig	eighty	thamanoon ثمانون / ثمانين	eighty
89	quatre-vingt-neuf	four-twenty-nine	neunundachtzig	nine and eighty	tisaa wa thamanoon تسعة وثمانون	nine and eighty
90	quatre-vingt-dix	four- twenty -ten	neunzig	ninty	tisseen تسعون / تسعين	ninty
91	quatre-vingt-onze	four- twenty eleven	einundneunzig	one and ninty	wahed wa tisseen واحد و تسعون	one and ninty
93	quatre-vingt-treize	four- twenty thirteen	dreiundneunzig	three and ninty	thalatha wa tissoun ثلاثة و تسعون	three and ninty
95	quatre-vingt-quinze	four- twenty fifteen	fünfundneunzig	five and ninty	khamisa wa tissoun خمسة و تسعون	five and ninty
97	quatre-vingt-dix-sept	four- twenty ten seven	siebenundneunzig	seven and ninty	sabaa wa tisoun سبعة و تسعون	seven and ninty
98	quatre-vingt-dix-huit	four- twenty ten- eight	achtundneunzig	eight and ninty	thamania wa tissoun ثمانية و تسعون	eight and ninty

Nbr	France	en anglais	Allemagne	en anglais	Syrie	en anglais
100	cent	hundred	hundert / einhundert	hundred	mia مئة	hundred
103	cent-trois	hundred-three	hundertdrei	hundred-three	mia wa thalatha مئة و ثلاثة	hundred and three
113	cent-treize	hundred-thirteen	hundertdreizehn	hundred-thirteen	mia wa thalatha ashar مئة و ثلاثة عشر	hundred and thirteen
140	cent-quarante	hundred-forty	hundertvierzig	hundred-forty	mia wa arbaoun مئة و أربعون	hundred and forty
200	deux-cent	two-hundred	zweihundert	two-hundred	miatain مئتين	(hundred - ain) *
206	deux cent six	two hundred six	zweihundertsechs	two hundred six	miatain wa sitta مئتين و ستة	* And six
220	deux cent vingt	two hundred twenty	zweihundertzwanzig	two hundred twenty	miatain wa ishroon مئتين وعشرون	* And twenty
1000	mille	thousand	tausend / eintausend	thousand	alf ألف	thousand

* Nous avons choisi la traduction en anglais comme référence ce qui permet d'expliquer la numération dans l'ensemble des systèmes numériques

Comparaison des systèmes linguistiques et apprentissage

Peu de recherches ont étudié l'influence de la variation des systèmes numériques verbaux sur la performance de transcodage. Seron et Fayol (1994) ont comparé la performance de transcodage auprès d'enfants Français et Belges francophones en deuxième année d'école primaire. Ils ont montré que les enfants Français qui utilisent l'énonciation irrégulière pour les nombres complexes (« 70 » et « 90 » énoncés respectivement « sixty-ten » et « four-twenty-ten » littéralement) produisaient plus d'erreurs que leurs homologues Belges dans une dictée des nombres contenant ces dizaines complexes. Par contre, les deux groupes produisent les mêmes types d'erreurs sur le nombre « 80 » qui a la même énonciation dans les deux pays *e.g.*, écrire « 4202 » pour « quatre-vingt deux ». Les auteurs ont pointé la limite du modèle sémantique de Power & Dal Martello (1990) à expliquer ces erreurs de ce type. Outre cette irrégularité concernant le système verbal français, d'autres aspects des variations du système numérique verbal ont été étudiés par (Haspelmath, Dryer, Gil & Comrie 2005 ; Comrie, 2005 ; Comrie, 2006 cité par Zuber, Pixner, Moeller, Nuerk, 2009), notamment l'ordre d'énonciation des unités lexicales composant les nombres DU. Plusieurs études neuropsychologiques ont montré que l'inversion d'ordre (UD au lieu de DU) posait un problème pour des patients adultes dans des tâches numériques basiques (Blanken, Dorn & Sinn, 1997 ; Proios, Weniger & Willmes, 2002). Proios et ses collaborateurs ont étudié le cas d'une patiente bilingue (grec-allemand) qui présentait des difficultés spécifiques avec cette propriété d'inversion d'ordre d'énonciation concernant des nombres allemands (nombres verbaux écrits) mais pas avec ces nombres dans la langue grecque où il n'y a pas d'inversion d'ordre. Elle produisait des erreurs d'inversion en transcodant les nombres allemands de leur forme verbale écrite dans leur forme en chiffres arabes (*e.g.*, écrire « 32 » pour « 23 ») Toutefois, les auteurs de cette étude n'ont pas tenté d'expliquer leurs résultats selon les modèles de transcodage numériques existants. Lochy et ses collègues (Lochy, Delazer, &

Seron, 2003 ; Lochy, Delazer, Domahs, Zoppoth, & Seron : manuscrit non publié cité par Kaufmann, & Nuerk 2005 et par Zuber, *et al*, 2009) ont étudié l'effet du sens d'énonciation sur le transcodage chez des enfants Autrichiens germanophones et Belges francophones en première année d'école primaire. Les résultats ont montré que les enfants Autrichiens produisaient plus d'erreurs sur les structures DU (dizaine-unité) que les enfants Belges. Ces erreurs correspondaient en grande majorité à des erreurs d'inversion (*e.g.*, écrire « 54 » pour « quarante-cinq » dit littéralement « cinq et quarante »).

Globalement, les résultats de ces études confirment l'idée que certaines caractéristiques linguistiques dans le système numérique verbal pourraient constituer des sources de difficultés pour les enfants lors de l'apprentissage. Ces difficultés proviendraient de la relation qui existe entre le système numérique verbal et l'écriture en chiffres arabes. Ces études sont cependant limitées et ne fournissent pas des données suffisantes ni des explications relatives aux modèles théoriques de transcodage.

La présente recherche tente de vérifier l'effet de certaines spécificités linguistiques des systèmes numériques verbaux, comme l'ordre d'énonciation et le sens d'écriture, sur le transcodage numérique du code verbal au code en chiffres. Ces effets analysés dans le cadre du dernier modèle de transcodage ADAPT et particulièrement dans sa version ADAPT_{BASIC} concernant le transcodage des nombres jusqu'à 99. Dans cette perspective, nous avons comparé les performances de transcodage chez trois groupes d'enfants au début de l'apprentissage scolaire en effectuant une dictée de nombres. Ces groupes utilisent des langues différentes : français, allemand et arabe (Tableau 3.3) ainsi que des systèmes numériques verbaux et un sens d'écriture différents (de gauche à droite pour la France et l'Allemagne et l'inverse pour la Syrie).

Ainsi, vu l'irrégularité existant dans le système numérique verbal français pour les nombres de 70 à 99, nous nous attendions à ce que les enfants Français produisent un pourcentage d'erreurs plus élevé en transcodant ces nombres dont l'énonciation est complexe (de 70 à 99) que leurs pairs Allemands et Syriens. A la différence des enfants Français, on s'attend à ce que les enfants Allemands et Syriens aient des difficultés de transcodage des nombres dont l'énonciation est inversée et contredit le sens général de l'écriture. Ainsi, et malgré un ordre d'énonciation des nombres DU similaire dans les deux systèmes numériques verbaux arabe et

allemand, nous pensons (1) que les enfants Allemands produiront plus d'erreurs sur les nombres DU que sur les nombres D puisque le sens d'énonciation des nombres DU contredit le sens d'écriture dans cette langue et (2) que les enfants Syriens produiront plus d'erreurs sur les nombres D que sur les nombres DU puisque l'énonciation de DU ne contredit pas le sens d'écriture dans la langue arabe. Quant aux nombres séparateurs et centaines, nous nous attendions à ce que les enfants Syriens produisent plus d'erreurs en transcodant les nombres 100, 1000 et les centaines que les Français et les Allemands, puisque l'ordre d'énonciation des primitives lexicales de ces nombres est globalement de gauche à droite (parfois même alterne) et n'est pas consistant avec le sens d'écriture général de la langue arabe. De plus, nous pensons que les nombres « 20 » et « 200 » énoncés de façon différente des autres nombres dizaines ou centaines en arabe seront traités différemment et pourraient donner lieu aux erreurs de type transcodage littéral complet.

Modèles théoriques et diversité des systèmes numériques verbaux :

Une question se pose : comment les modèles théoriques de transcodage des nombres peuvent-ils rendre compte de cette diversité des systèmes numériques verbaux ?

Parmi les deux grands groupes des modèles : sémantiques et asémantiques, deux modèles seulement s'intéressaient à rendre compte du transcodage chez les enfants : le modèle de Power et Dal Martello (1990) qui est un modèle sémantique, et récemment le modèle ADAPT de Barrouillet *et al.* (2004) qui est un modèle asémantique. Dans leur modèle, Power et Dal Martello considèrent, et en accord avec McCloskey (1992), que le transcodage d'un nombre de son code verbal dans son code en chiffres arabe procède en deux stades : le stade de compréhension et le stade de production. Dans le stade de compréhension, une représentation sémantique sera construite en traitant le code verbal. Cette représentation sémantique doit refléter la structure verbale du nombre. Pour Power et Dal Martello, on distingue les primitives lexicales (les unités de 1 à 9) et les primitives sémantiques (« dix » et les séparateurs « cent », « mille »..). Ces primitives seraient transformées directement dans une représentation sémantique *e.g.*, « cinq » → C 5, « cent » → C 100 (le préfixe « C » sert à distinguer les concepts sémantiques des formes arabes). Les autres nombres (non-primitives) seraient représentés comme la somme ou le produit de plusieurs primitives de valeurs inégales. Par exemple, « cinquante » sera représenté comme C10 x C5, « quinze » sera représenté comme C10 + C5, « quatre cent cinquante-deux » sera représenté comme (C100 x C4) + [(C10 x C5) + C2]. Ensuite, un système de production convertit cette représentation sémantique dans des chiffres arabes en activant deux types d'opérations selon les relations de

somme et de produit exprimées dans la représentation sémantique existante. Ainsi, une opération de concaténation sera activée lorsque la représentation contient une relation de produit (*e.g.*, « cinquante » \rightarrow C10 x C5 \rightarrow < 5 > & 0 \rightarrow 50), et une opération de sur-écriture (écrire sur le zéro de droite) sera déclenchée dans le cas d'une relation de somme [*e.g.*, « quinze »] \rightarrow C10 + C5 \rightarrow < 10 > # < 5 > \rightarrow 15. Dans une étude de Noël et Seron (1997) portant sur des nombres comme « 1200 » énoncé de manières différentes : « mille deux cent » et « douze cent » pour laquelle la représentation sémantique devait être la même, une différence de traitement a été observée et les modèles sémantiques échouaient donc à expliquer cette différence.

Les systèmes numériques verbaux étant variés, un modèle de transcodage devrait être applicable dans toutes les langues. La représentation sémantique et les règles de concaténation et de sur-écriture de Power et Dal Martello peuvent-elles rendre compte du transcodage dans un système numérique verbal qui inverse l'ordre d'énonciation de DU ? Pour transcoder un nombre comme « vingt-cinq » selon ce modèle une représentation sémantique sera construite : (C10 x C2) + C5 \rightarrow (< 2 > & 0) # < 5 > \rightarrow < 20 > # < 5 > \rightarrow 25. Comme on peut le constater, l'inversion d'ordre d'énonciation DU n'est pas prise en considération et les processus de transcodage proposés ne sont pas appropriés car le nombre doit être inversé avant. Ainsi, le système de Power et Dal Martello ne prédit pas d'erreur d'inversion.

ADAPT (un modèle asémantique procédural de transcodage des nombres de leur forme verbale dans leur forme en chiffres arabes) suggère pouvoir rendre compte du transcodage dans des différentes langues avec une modification de ces procédures. En effet, les auteurs du modèle ADAPT le considèrent relativement indépendant des spécificités linguistiques. Il est capable de rendre compte par exemple des processus de transcodages dans une langue dite transparente comme la langue japonaise qui reflète complètement l'organisation en puissance de dix. Ainsi, pour cette langue et pour les nombres jusqu'à 99, ADAPT_{BASIC} (*cf. infra* tableau 3.7) exige deux règles (Pa et Pa') pour transcoder les unités, deux règles d'arrêts (Pe et Pe') et une règle pour gérer l'équivalent de « dix », qui a une seule action : « placer une case vide en chaîne ». De ce fait, la simplicité de ce modèle, liée au fait que l'accès seulement à une classe lexicale est demandé (classe des unités), explique pourquoi les enfants Asiatiques montrent de meilleures performances que les enfants Occidentaux (Miura *et al.*, 1993, 1994). De même, ce modèle a montré qu'il pouvait rendre compte des différences de traitement liées seulement à la forme linguistique, comme par exemple la différence de traitement de « 1200 » énoncé « mille deux cent » ou « douze cent ». ADAPT l'explique en variant le type et le

nombre de règles exigées pour transcoder ce nombre énoncé de deux manières différentes. C'est à dire, pour transcoder le nombre « mille deux cent » il faut 4 règles selon ADAPT_{ADV} (P3a, P1, P2d et P4b), alors que pour transcoder le nombre « douze cent » il faut seulement trois règles (P1, P2b, et P4b)

Ainsi, on peut imaginer que pour transcoder des nombres dans une langue qui inverse l'ordre d'énonciation des chiffres DU (comme la langue allemande) ou dans une langue avec un sens d'écriture de droite à gauche (comme la langue arabe) il faut ajouter ou modifier certaines règles pour que le modèle ADAPT fonctionne. Ce modèle n'a jamais été testé sur les langues qui inversent l'ordre d'énonciation des chiffres DU ni sur les langues dont le sens d'écriture est de droite vers la gauche.

Le modèle ADAPT et les règles de transcodage

Nous nous intéressons dans cette étude à étendre le modèle ADAPT. Ainsi, nous discutons nos résultats dans le cadre de ce modèle dans la perspective de proposer les modifications nécessaires pour lui permettre de rendre compte des différentes propriétés langagières étudiées. Nous travaillons sur la version ADAPT_{BASIC} concernant les règles de transcodage des nombres jusqu'à 99 c'est à dire la première phase d'apprentissage.

Selon ADAPT, suite à l'encodage de la forme verbale du nombre, un système de « parsing » découpe cette chaîne verbale du début du signal auditif jusqu'à sa fin. ADAPT suppose que le découpage des formes verbales écrites se fait dans le sens de la lecture de gauche à droite (il ne précise pas si ce sera le cas pour les formes verbales orales et dans les langues dont le sens d'écriture est inversé). Chaque élément isolé par le système de « parsing » est stocké temporairement en mémoire de travail pour être ensuite traité, l'un après l'autre, par le système de production (les règles de transcodage). Ainsi, pour transcoder un nombre comme « vingt-cinq » en français, il faut trois règles selon ADAPT_{BASIC} : la première est la règle Pb dont le rôle est de chercher « 2 » en MLT et de placer une case vide dans la chaîne numérique en construction. Ensuite, une règle Pa' est exigée pour trouver la valeur positionnelle de l'unité « 5 » en MLT et la placer dans la case vide créée par la règle précédente. Enfin, la règle d'arrêt Pe se déclenche lorsqu'il n'y a plus d'unité à traiter dans la mémoire de travail.

France

« Twenty-five »
- « Twenty » = « dec » Frame = no → Pb Action : find 2 in LTM set frame_ in chain read next input
- « Five » = « unit » Frame = yes → Pa' Action : Find Val= 5 in LTM set 5 in empty slot of the frame
- End of chain Frame = no → Pe Action = stop

Pour transcoder ce même nombre « vingt-cinq » dans le système numérique verbal allemand qui inverse l'énonciation du DU « fünfundzwanzig » qui est « five and twenty » littéralement, on s'attend à avoir une modification de certaines procédures du modèle. Ainsi, les règles de transcodage nécessaires pour transcoder les nombres DU en français (Pb, Pa' et Pe) ne sont pas adaptées au transcodage de ces nombres en allemand. Ceci est dû au fait que l'énonciation des DU est inversée (UD) et contredit donc le sens d'écriture. Par conséquent, nous supposons que le traitement de ces nombres serait différent et exigerait non seulement une modification des règles mais en plus un recours (supplémentaire) à la mémoire de travail pour s'adapter à la contradiction entre le sens d'énonciation et le sens d'écriture.

Concernant la langue arabe, on s'attend à devoir apporter d'autres modifications dans le modèle pour transcoder ce nombre. Ce système a la même énonciation des nombres DU que le système allemand, c'est à dire qu'il commence par l'unité puis énonce la dizaine mais le sens d'écriture est différent dans la langue arabe (de droite à gauche). Les procédures de transcodage des nombres DU et D ne seraient pas les mêmes que celles qu'utilisent les enfants Allemands ou Français. Pour l'enfant Syrien, le recours (supplémentaire) à la mémoire de travail ne serait pas nécessaire pour transcoder les nombres DU. Ceci pourrait toutefois l'être lors du transcodage des nombres dizaines (D) ainsi que celui des nombres à partir de 100, puisque le sens d'énonciation de ces nombres est de droite à gauche et contredit donc le sens d'écriture dans la langue arabe.

Ainsi nous nous attendions à ce que les erreurs produites par les enfants Allemands et Syriens soient différentes de celles produites par les enfants Français. Une différence de traitement

serait due à la contradiction entre le sens d'énonciation des nombres et le sens d'écriture existant dans les systèmes allemand et syrien.

Méthode

Participants

Cent-quatre-vingt-sept enfants Français (90 filles, âge moyen : 6 ; 7 écart-type : 4 mois), 181 enfants Syriens (98 filles, âge moyen 6 ; 7, écart-type : 4 mois) et 168 enfants Allemands (82 filles, âge moyen 7 ; 4, écart-type : 4 mois) des classes de 1^{ère} année d'école primaire ont participé à cette étude. La moyenne d'âge des enfants Allemands était plus élevée.

Matériel

Cinquante nombres ont été dictés. Cinq de ces nombres étaient composés d'un chiffre (entre 1 et 9), trente-sept de deux chiffres (entre 10 et 99), sept de trois chiffres (entre 100 et 220 inclus) et un séparateur à quatre chiffres (1000). Les nombres ont été choisis en fonction de leur structure lexicale. Dans la langue française, ces nombres se répartissent en 9 catégories : les unités (U) qui vont de 1 jusqu'à 9, les particuliers (P) de 11 jusqu'à 16, les dix-unités (dix-U) qui sont [17, 18, 19], les dizaines simples (Ds) c'est à dire les dizaines inférieures à 70, les dizaines unités simples (DUs) [21, 22,...,69], les dizaines complexes (Dc) qui sont [70, 80, et 90], les dizaines unités complexes (DUc) c'est à dire les dizaines unités supérieures à 70 [71, 72, ... ,99], les centaines (nombres composés avec cent) et les séparateurs (cent et mille). Dans les langues allemande et syrienne, ces nombres se répartissent en 6 catégories : les unités (U), les nombres de 11 à 19²⁰ ont la même structure de DU, les Dizaines (D) [10, ... ,90], les Dizaines-unité (DU) [11,...99], les Centaines (nombres composés avec cent *e.g.*, 113) et deux séparateurs [100 & 1000]. Deux ordres des nombres ont été aléatoirement construits pour éviter un éventuel effet d'ordre (Annexe 2).

²⁰ En Allemagne les nombres « 11 » et « 12 » ont une énonciation différente du reste des nombres de 13 jusqu'à 19 comme pour « eleven » et « twelve » en anglais. Ainsi nous allons les nommer « nombres particuliers », ils devraient donner lieu à un apprentissage par cœur. Les nombres de 13 à 19 ont la même structure de DU que les nombres de 11 à 19 en Syrie.

Procédure

La tâche de dictée a été administrée collectivement. Cinquante nombres ont été dictés dans chaque ordre. Les enfants de chaque pays étaient répartis en deux groupes : le premier groupe d'enfants écrivait les nombres selon un ordre, le second selon l'autre ordre. Chaque enfant recevait une grille de réponses contenant cinquante cases qu'ils devaient compléter par les nombres dictés. Un dessin était représenté dans chaque case – à droite ou à gauche selon le sens d'écriture – (donc 50 dessins différents organisés en deux colonnes), permettant aux enfants de se repérer pendant la dictée. Avant de dicter chaque nombre, l'expérimentateur précisait le dessin à côté duquel il fallait l'écrire. Chaque nombre était répété deux fois. L'expérimentateur vérifiait que chaque enfant avait eu le temps d'écrire sa réponse avant de dicter le nombre suivant.

Résultats

Le transcodage des 50 nombres a conduit à 2933 erreurs (31%) au total en France, 1372 erreurs (16%) en Allemagne et 1688 (19%) en Syrie (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 : pourcentage d'erreurs et de non-réponses pour les enfants Français, Allemands et Syriens

	Français N = 187	Allemands N = 168	Syriens N = 181
% d'erreurs (écart-type)	31 (23)	16 (17)	19 (10)
% de non-réponses (écart-type)	4 (11)	0.4 (2)	2 (3)

Comme le montre le tableau 3.4, les enfants Français ont produit un pourcentage d'erreurs plus élevé sur les 50 nombres dictés par rapport à leurs homologues Allemands $F_1(1, 353) = 47.89$, $p < .0001$, $F_2(1, 49) = 41.56$, $p < .0001$ et Syriens $F_1(1, 366) = 46.87$, $p < .0001$, $F_2(1, 49) = 13.42$, $p = .001$. Ces deux derniers présentent, quant à eux, une performance globalement similaire $F_1(1, 347) = 2.41$, $p = .22$, $F_2(1, 49) = 1.07$, $p = .31$. Les non-réponses constituent un pourcentage globalement faible pour l'ensemble des groupes et en particulier pour les enfants Allemands. Les non-réponses des enfants français ont été produites surtout

sur les nombres complexes (à partir de 70 ; $M = 8\%$, $SD = 2\%$) alors que les nombres des catégories inférieures ne donnent lieu qu'à 2 % ($SD = 1\%$) de non-réponses.

Afin d'illustrer la différence de performance de transcodage des enfants, nous présentons ci-après les pourcentages d'erreurs sur les 50 nombres dictés en fonction de la nationalité des enfants (Figure 3.1).

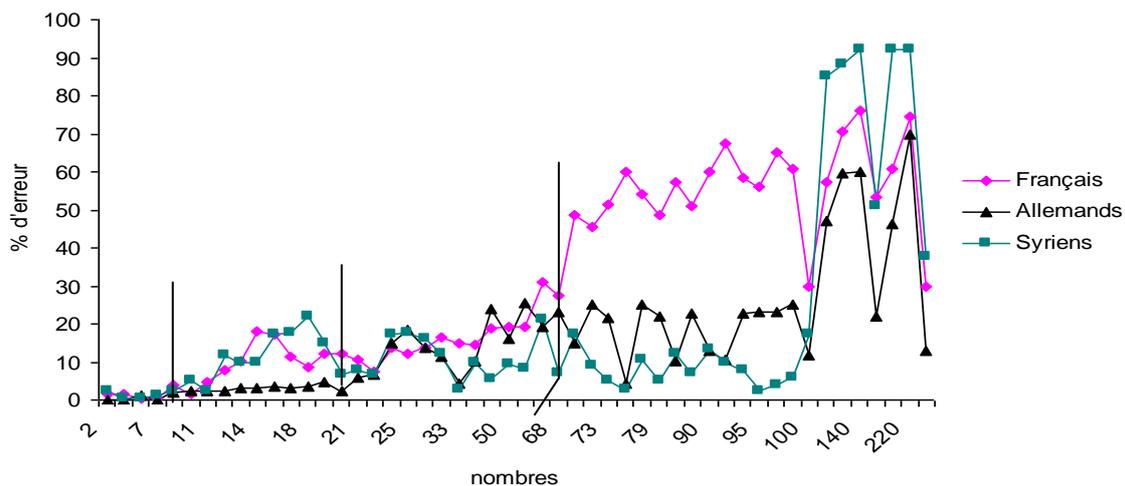


Figure 3.1 : Pourcentage d'erreurs sur les nombres dictés en fonction de la nationalité des enfants: Français, Allemands et Syriens

Comme on peut le constater, globalement, la performance des enfants Allemands et Syriens ne différait pas significativement sur les nombres inférieurs à 100, $F_1(1, 347) = 3.08$, $p = .08$, $F_2(1, 41) = 2.81$, $p = .10$. La performance des trois groupes différait moins sur les nombres inférieurs à 68 que sur les nombres supérieurs à 70. Le transcodage des nombres unités ne posait pas de difficultés à l'ensemble des enfants (2% d'erreurs chez les enfants Français et 1% d'erreurs chez les Allemands et les Syriens). La performance de l'ensemble des enfants différait, par contre, sur les nombres de 11 à 19 $F_1(2, 533) = 17.78$, $p < .0001$, $F_2(2, 14) = 14.56$, $p < .0001$. Ces nombres étaient plus faciles pour les enfants Allemands (3% d'erreurs) que pour les Français (11%) $F_1(1, 353) = 24.35$, $p < .0001$, $F_2(1, 7) = 28.43$, $p = .001$ et les Syriens (13% d'erreurs), $F_1(1, 347) = 37.33$, $p < .0001$, $F_2(1, 7) = 24.31$, $p < .01$ respectivement. Par contre, il n'y avait pas de différence significative entre la performance des enfants Syriens et Français sur ces mêmes nombres $F_1(1, 366) = 0.95$, $p = .33$, $F_2 < 1$ n.s. Concernant les nombres de 21 jusqu'à 68, la performance des enfants des trois groupes diffère globalement (pourcentage d'erreurs : 17%, 15% et 11% respectivement pour les Français, les

Allemands et les Syriens) $F_1(2, 533) = 3.85, p < .05, F_2(2, 24) = 4.81, p < .05$. Plus précisément, cette différence était significative uniquement entre les Français et les Syriens $F_1(1, 366) = 7.89, p = .01$. En outre, lorsqu'on passe aux nombres suivants (de 70 à 99), la performance des trois groupes diffère fortement $F_1(2, 533) = 127.58, p < .0001, F_2(2, 26) = 197.22, p < .0001$. Cette forte différence de performance est due essentiellement à la faible performance des enfants Français (56% d'erreurs) par rapport à leur pairs Allemands (19%) $F_1(1, 353) = 94.44, p < .0001, F_2(1, 13) = 161.2, p < .0001$ et Syriens (8%) $F_1(1, 366) = 224.92, p < .0001, F_2(1, 13) = 460.19, p < .0001$ respectivement. En outre, la performance de ces deux derniers différait significativement aussi sur ces nombres $F_1(1, 347) = 20.57, p < .0001, F_2(1, 13) = 20.51, p < .001$. Concernant les 8 nombres²¹ de 100 à 1000 dictés (« 100 », 6 nombres composés avec « cent » appelés nombres centaines et le nombre « 1000 »), les résultats de l'ensemble des enfants des trois groupes Français, Allemands et Syriens ont montré un taux d'erreurs relativement élevé (57%, 41% et 69% respectivement). Globalement, leur performance différait significativement sur ces nombres $F_1(2, 533) = 44.44, p < .0001, F_2(2, 14) = 22.55, p = .0001$. Les enfants Syriens avaient plus de difficultés sur ces nombres que les Français $F_1(1, 366) = 19.98, p < .0001, F_2(1, 7) = 6.02, p < .05$ et que les Allemands $F_1(1, 347) = 115.18, p < .0001, F_2(1, 7) = 44.82, p < .001$. Par ailleurs, nous observons que « cent » et « mille » posent relativement moins de difficulté aux enfants des trois groupes Français, Allemands et Syriens (30%, 13% et 27% respectivement) que les centaines (65%, 51% et 84% respectivement) (Fig.3.1).

Pour comprendre en quoi consistaient les erreurs produites sur les nombres dictés, nous avons procédé au repérage de l'erreur principale, c'est-à-dire l'erreur la plus fréquemment produite sur chacun des nombres dictés pour les trois groupes. Elles sont présentées dans le Tableau 3.5 ci-après.

²¹ Ces nombres (hormis "100" pour les enfants Allemands) ne sont pas étudiés en première année d'école élémentaire.

Tableau 3.5 : erreurs les plus fréquentes sur chaque nombre dicté pour les trois groupes

	France 187	erreur plus fréquente	Nbr de fois	Allemagne 168	erreur plus fréquente	Nbr de fois	Syrie 181	erreur plus fréquente	Nbr de fois
Nbr	% Err			% Err			% Err		
2	2	-		0	-	-	2	8	2
4	2	-		0	-	-	1	-	-
5	1	-		1	-	-	1	-	-
7	1	-		0	-	-	1	-	-
9	4	39 / 6	2 / 2	2	-	-	2	-	-
10	2	-		2	-	-	5	01	4
11	5	-		2	-	-	2	-	-
12	8	21	4	2	-	-	12	21	9
13	10	30	4	3	31	2	10	31	6
14	18	40	11	3	41 / 40	2 / 2	10	41	8
15	17	51	4	4	51	4	17	25 / 51	10 / 9
17	11	107	9	3	710	2	18	71	9
18	9	108	10	4	80	3	22	28	10
19	12	109	9	5	910	4	15	91	10
20	12	21 / 21	4 / 4	2	-	-	7	1010 / 100	3 / 3
21	11	11	3	6	120	4	8	201 / 210	2 / 2
22	7	12	3	7	220	5	7	202	3
23	14	203	7	15	32	12	17	32	6
25	12	205	5	18	52	14	18	52	5
27	14	207	9	14	72	14	16	17	10
30	17	13	8	11	03	7	12	03	8
33	15	133	4	4	-	-	3	44	2
40	14	41 / 44	3 / 3	10	14	5	10	04 / 44	6 / 6
47	19	407	7	24	74	26	6	74	4
50	19	55	3	16	05	10	9	05	8
52	19	502	12	26	25	23	8	25	10
60	31	50	7	19	06	10	21	20	6
68	27	28 / 608	5 / 5	23	86	28	7	86	3
70	49	610	11	15	17	6	17	07	8
72	45	410	13	25	27	37	9	27	6
73	51	63	11	21	37	30	5	37	3
77	60	617 / 67	18 / 18	4	707	2	3	-	-
78	54	618 / 68	13 / 13	25	87	30	10	87	14
79	49	619	15	22	97	31	5	97	9
80	57	420	17	10	08 / 8	4 / 4	12	88	9
89	51	49	22	23	98	32	7	98	9
90	60	410	13	13	19	7	13	09	13
91	67	42011	16	11	19	6	10	19	14
93	58	83	17	23	39	32	8	39	5
95	56	45	11	23	59	30	2	59	2
97	65	417	11	23	79	29	4	79 / 67	2 / 2
98	61	42018	13	25	89	31	6	89	4
100	30	1000	22	12	110 / 101	5 / 5	17	1000	7
103	57	1003	52	47	1003	43	85	3100 / 1003	52 / 44
113	71	10013	38	60	10013	28	88	13100 / 10013	35 / 32
140	76	10040	32	60	1004	17	92	4100 / 1004	28 / 25
200	53	2100	31	22	102	9	51	100100	2
206	61	2006	24	46	2006	37	92	2006	27
220	74	20020	23	70	20020	39	92	2100 / 2200 / 2002	14 / 13 / 13
1000	30	10000	12	13	100	4	38	100	12

Nbr : nombre / Nbr de fois = nombre d'enfant produisant l'erreur

Effet du sens de l'énonciation verbale du nombre et du sens d'écriture :

Afin de vérifier l'effet de l'inversion d'ordre d'énonciation de DU (qui marque les systèmes numériques verbaux allemand et arabe étudiés) sur le transcodage, ainsi que le sens de l'écriture ($G \rightarrow D$ en Allemagne, $G \leftarrow D$ en Syrie), nous avons procédé au calcul des pourcentages moyens des erreurs produites sur les structures Dizaines (D) et Dizaine-unité (DU) pour les trois groupes étudiés. Nous avons choisi de comparer les D avec les DU puisque pour les Dizaines (D), et pour les DU, l'ordre d'énonciation est identique en allemand et en arabe, seul change le sens général d'écriture. Ainsi, l'analyse effectuée sur le taux d'erreurs produites sur ces structures permet de savoir si une contradiction entre l'ordre d'énonciation de DU et le sens de l'écriture a une influence sur le transcodage du nombre (Figure 3.2).

Il faut mentionner que les nombres de 11 à 19 ont été exclus de cette analyse. Ces nombres étaient significativement plus difficiles (13% d'erreurs) que les nombres DU (8% d'erreurs) $F(1, 180) = 16.77, p = .0001$ pour les enfants Syriens. Par contre, pour les enfants Allemands ces nombres étaient significativement plus facile (3% d'erreurs) que les DU (18%) $F(1, 167) = 57.34, p < .0001$.

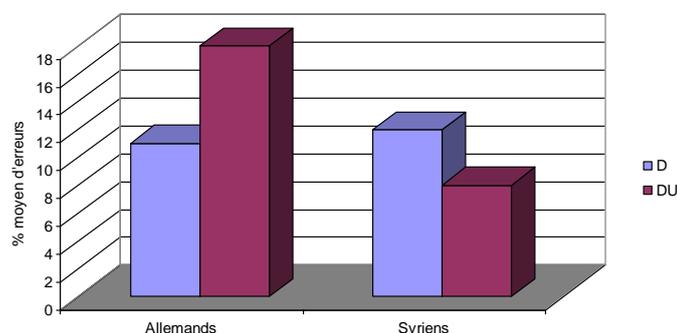


Figure 3.2 : % moyen d'erreurs sur les structures Dizaines (D) et Dizaines-unité (DU) pour les enfants Allemands et Syriens

L'analyse de la figure 3.2 montre que les enfants Syriens ont produit significativement plus d'erreurs sur les nombres Dizaines (D) que sur les nombres Dizaine-unités (DU) (12% et 8% d'erreurs respectivement) $F(1, 180) = 7.70, p < .01$. Par contre, c'est l'inverse qui se produit pour les enfants Allemands ; les nombres Dizaines-unités sont significativement plus difficiles (18% d'erreurs) que les nombres Dizaines (11% d'erreurs) $F(1, 167) = 12.21, p < .001$. Ainsi, les enfants Syriens et Allemands se comportaient différemment dans le transcodage des dizaines et les dizaines-unités, et l'interaction était significative $F(1, 27) = 12.85, p = .001$. Les enfants Syriens avaient plus de facilités pour écrire les DU que les D et

inversement pour les enfants Allemands. Les nombres DU dont l'ordre d'énonciation contredit le sens d'écriture en Allemand, étaient significativement plus difficiles pour les enfants Allemands que pour les enfants Syriens $F(1, 27) = 35.15, p < .0001$. Par contre, les nombres (D) n'étaient pas significativement plus difficiles pour les Syriens que pour les Allemands $F < 1$. En résumé, pour les langues syrienne et allemande, la contradiction entre l'ordre d'énonciation et le sens de l'écriture du nombre influence le transcodage. L'étude des erreurs produites dans chaque système numérique nous renseignera sur cette interaction (et ses effets).

Analyse qualitative des erreurs de transcodage

Afin de voir en quoi consistent les erreurs, nous avons effectué une analyse qualitative des erreurs produites. Cette analyse inclut uniquement les erreurs produites au moins deux fois à l'intérieur d'une catégorie de nombre à l'exception des non-réponses (*cf.* tableau 3.6).

Tableau 3.6 : Nombre et pourcentage des erreurs classées pour chaque groupe

	Français	Allemands	Syriens
Nombre total d'erreurs			
sans les non-réponses	2527	1342	1547
Nombres d'erreurs classées	1907	1161	1322
% d'erreurs classées	76 %	87 %	85 %

Ainsi, avons-nous pu classer 76% des erreurs chez les enfants Français (*cf. supra* partie 2.3), 87% chez les Allemands et 85% chez les Syriens. Les erreurs non classées étaient des erreurs produites une seule fois et pourraient donc être dues au hasard.

Comme cela a été fait dans l'étude d'ADAPT et dans nos études précédentes, les erreurs observées dans nos échantillons ont été aussi classées selon leur nature lexicale ou syntaxique (Figure 3.3) pour être subdivisées ensuite en plusieurs groupes. D'autres erreurs qui ne correspondent à aucune de ces catégories ont été considérées comme « inclassables ». Il faut noter qu'une erreur de type inversion qui était classée dans nos études précédentes comme erreur lexicale (pour les Français) est une erreur syntaxique pour les Allemands et les Syriens.

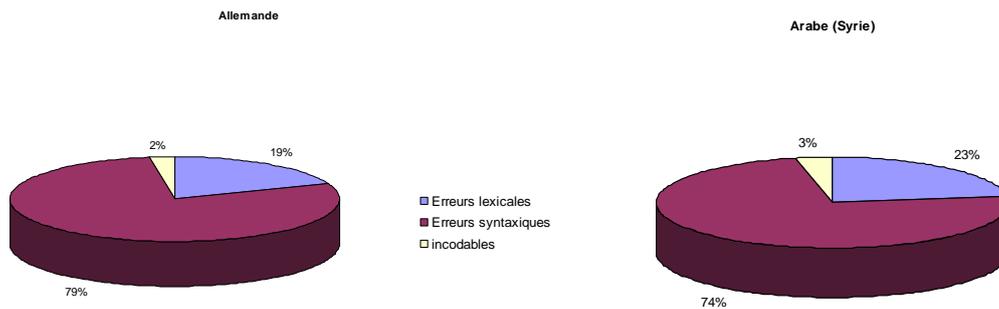


Figure 3.3 : Pourcentage des erreurs lexicales, syntaxiques (erreurs pures) et inclassables, en fonction de la langue (allemand vs arabe).

Système numérique verbal allemand :

En ce qui concerne les enfants Allemands, les erreurs syntaxiques sont plus nombreuses que les erreurs lexicales (79% et 19% respectivement, figure 3.3). Les erreurs syntaxiques se trouvent essentiellement sur **Dizaine-unités** et les **Centaines** (Figure 3.5). Les erreurs lexicales sont fréquentes sur les catégories **Dizaines** et **Séparateurs**. Sur le total des erreurs syntaxiques, l'erreur d'inversion était la plus fréquente et constituait seule 51% de ces erreurs. Concernant les erreurs lexicales, l'erreur de pile était la plus fréquente et constituait 80% de ces erreurs. L'erreur de substitution, c'est-à-dire le remplacement d'un ou de plusieurs chiffres corrects du nombre par d'autres non corrects, était généralement peu fréquente (contrairement aux enfants Français où elle était l'erreur lexicale la plus fréquente). Par ailleurs, nous avons observé des erreurs mixtes (à la fois syntaxique et lexicale) : le type d'erreur le plus fréquent était ce qu'on a appelé « transcodage littéral complet avec erreur de pile » comme par exemple écrire 1004 pour « cent-quarante » et 1003 pour « cent-treize ».

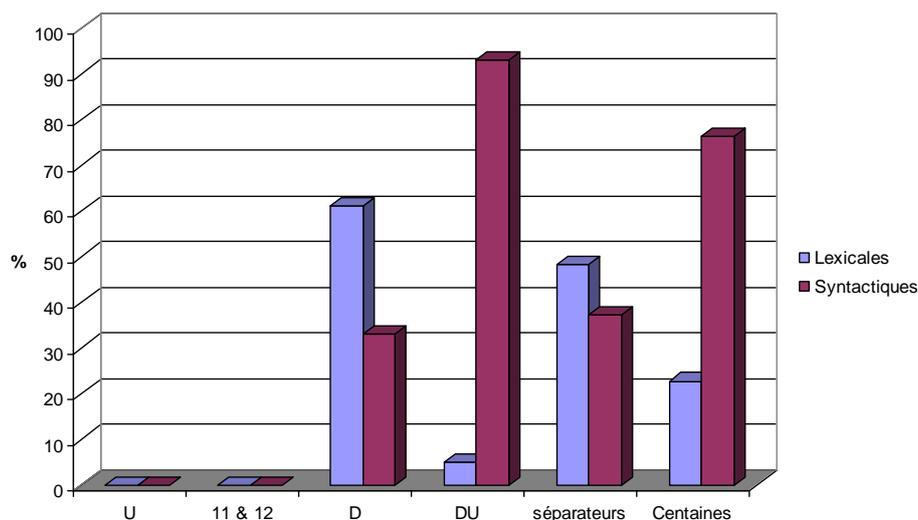


Figure 3.5 : Pourcentage d'erreurs lexicales et syntaxiques dans chaque catégorie de nombre chez les enfants **Allemands**

Comme on peut le constater, les nombres (11 & 12) ne donnent pas lieu à des erreurs. Ils sont comparables aux nombres de 1 à 10 et doivent être appris par cœur. Concernant les **Dizaines**, l'erreur d'inversion était l'erreur syntaxique principale (96% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie *e.g.*, écrire « 05 » pour « 50 »). Une erreur syntaxique peu fréquente (2 fois) sur cette catégorie était d'écrire « 910 » pour « neunzig » littéralement « ninty ». Par ailleurs, l'erreur de pile était l'erreur lexicale la plus fréquente [84% des erreurs lexicales dans cette catégorie *e.g.*, écrire « 19 » (neunzehn) pour « 90 » (neunzig)]. L'erreur de substitution apparaissait peu (17% *e.g.*, écrire « 51 » pour « 50 »).

Sur les **Dizaine-unités** les erreurs syntaxiques sont les plus fréquentes. L'erreur d'inversion de DU était la plus fréquemment observée sur cette catégorie et elle constituait 80% des erreurs syntaxiques produites sur les DU, *e.g.*, écrire « 27 » pour « 72 » (zwei**und**siebzig : qui se traduit littéralement par « two and seventy » et écrire « 51 » pour « 15 » : fünfzehn » qui se traduit littéralement « five-ten »). D'autres erreurs syntaxiques, moins fréquentes, correspondaient au transcodage littéral complet. Par exemple, écrire « 740 » pour « 47 » (sieben**und**vierzig : qui se traduit littéralement par « seven and forty »). Par ailleurs, parmi les erreurs lexicales, l'erreur de pile était l'erreur principale sur cette catégorie (59% des erreurs lexicales *e.g.*, écrire « 12 » « zwölf » pour « 22 » « zwei**und**zwanzig » et écrire « 80 » « achtzig » pour « 18 » « achtzehn »). Nous avons moins observé l'erreur de substitution (41% des erreurs lexicales *e.g.*, écrire « 71 » pour « 27 »).

Sur les **séparateurs** cent et mille, les erreurs syntaxiques correspondaient essentiellement à l'ajout ou à la suppression d'un zéro (80% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie) *e.g.*, écrire « 1000 » pour « cent » ou « 100 » pour « mille ». Un autre type d'erreurs correspondait à l'ajout de 2 zéros (20% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie) comme écrire « 100000 » pour « mille ». L'erreur de substitution constitue la seule erreur lexicale produite sur cette catégorie (*e.g.*, écrire « 110 » pour « 100 » et « 1100 » pour « mille »).

Concernant les **Centaines**, les erreurs syntaxiques étaient de plusieurs types. Ce qui apparaissait le plus fréquemment sur cette catégorie était le transcodage littéral complet : *e.g.*, écrire « 1003 » pour « cent-trois » (*cf* Tableau 3.5). Ce type d'erreur constituait 53% des erreurs syntaxiques. Les erreurs mixtes constituaient 20% des erreurs syntaxiques. Ces erreurs correspondaient au transcodage littéral complet avec inversion (mixte) [*e.g.*, écrire « 6002 » pour « deux cent six »], au transcodage littéral partiel avec inversion (mixte) [*e.g.*, écrire « 1300 » pour « cent treize »], au transcodage littéral complet avec une erreur de pile (mixte) [*e.g.*, écrire « 1004 » pour « cent quarante »], au transcodage littéral partiel avec une erreur de pile (mixte) [*e.g.*, écrire « 1014 » pour « cent quarante »] et au transcodage littéral complet avec une erreur de substitution [*e.g.*, écrire « 10041 » pour « cent quarante »]. Ces trois dernières erreurs étaient peu fréquentes. Ces types d'erreurs syntaxiques (mixtes) accompagnés d'une inversion (c'est à dire les erreurs de transcodage littéral complet ou partiel accompagnés d'une inversion) n'ont pas été observés chez les enfants français. En outre, 11% des erreurs syntaxiques correspondaient à l'ajout d'un zéro (*e.g.*, écrire « 1040 » pour « cent quarante » et « 2000 » pour « deux cent »). L'erreur de type transcodage littéral partiel était moins fréquente et concernait 10% des erreurs syntaxiques (*e.g.*, écrire « 3 » pour « cent-trois » et écrire « 2106 » pour « deux-cent-six »]. L'erreur d'inversion était peu fréquente sur cette catégorie (1% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie : *e.g.*, écrire « 602 » pour « 206 »). D'autres types d'erreurs peu fréquents (2% et 3% des erreurs syntaxiques sur les centaines) ont également été répertoriés : l'ajout de 2 et de 3 zéros comme écrire « 10003 » pour « cent trois » et « 200020 » pour « deux cent vingt ». S'agissant des erreurs lexicales, l'erreur de pile était la plus fréquemment observée (93% des erreurs lexicales dans cette catégorie) était d'écrire par exemple « 202 » pour « 220 » (*zweihundertzwanzig* » qui se traduit littéralement par « two hundred twenty » en anglais). L'erreur de substitution était peu fréquente (7% des erreurs lexicales sur ces catégories *e.g.*, « 013 » pour « 113 »).

Système numérique verbal Syrien :

En ce qui concerne les enfants Syriens, les erreurs syntaxiques étaient plus nombreuses que les erreurs lexicales (74% et 23% respectivement, Figure 3.3).

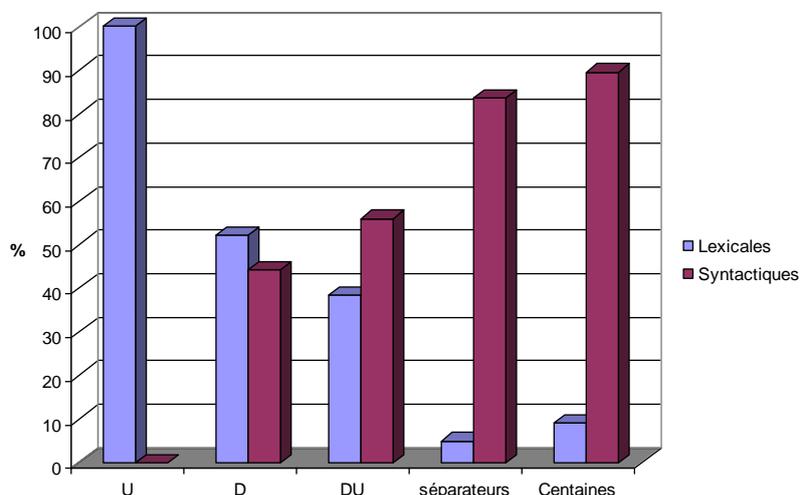


Figure 3.6 : Pourcentage d'erreurs lexicales et syntaxiques dans chaque catégorie de nombre chez les enfants Syriens

Les erreurs syntaxiques des enfants Syriens étaient essentiellement produites sur les DU, les séparateurs et les centaines (56%, 84% et 90% des erreurs analysées sur chaque catégorie respectivement, Figure 3.6). Par ailleurs, nous avons observé des erreurs mixtes (à la fois syntaxiques et lexicales en même temps) dont le type le plus fréquent était « transcodage littéral complet avec inversion ». S'agissant des erreurs lexicales, elles étaient un peu plus nombreuses que les erreurs syntaxiques sur la catégorie Dizaines (Figure 3.6).

Concernant les **Unités** une erreur a été classée comme erreur de position dans la pile, mais qui pourrait être due à une confusion de la forme en chiffres, a été observée deux fois lors de l'écriture de 8 (^) pour « deux » (٢). Quant aux **Dizaines**, les erreurs de pile étaient les plus fréquemment observées (79% des erreurs lexicales sur cette catégorie). Ces erreurs de pile consistaient essentiellement à répéter deux fois le chiffre des dizaines : par exemple, écrire « 88 » pour « 80 » et « 77 » pour « 70 » et dans quelques cas écrire le chiffre des dizaines uniquement comme écrire « 7 » pour « 70 ». Ces erreurs montrent que les enfants avaient une difficulté avec le zéro qui doit être placé à droite (après avoir écrit le chiffre des dizaines) et qui n'est pas énoncé. D'autres erreurs, moins fréquentes, correspondaient à l'erreur de position dans la pile comme écrire « 20 » pour « soixante ».

Quant aux erreurs syntaxiques, l'erreur d'inversion était la plus fréquente (88% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie) *e.g.*, écrire « 07 » pour « 70 ». Ainsi que nous l'avions suggéré pour les nombres « 20 » et « 100 », 8% des erreurs syntaxiques correspondaient au transcodage littéral complet comme écrire « 1010 » ou « 100 » pour « vingt » (énoncé « ishroon » *cf. supra*) et 4% correspondaient à l'ajout d'un zéro comme écrire « 100 » pour « dix ».

Concernant les **Dizaines-unités**, les erreurs d'inversion étaient les plus fréquentes et constituaient 75% des erreurs syntaxiques (*e.g.*, écrire « 87 » pour « 78 » dite littéralement « eight and seventy » ou écrire « 91 » pour « dix-neuf » dite littéralement « nine-ten »). Par ailleurs, 15% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie étaient de type transcodage littéral complet (*e.g.*, écrire « 207 » pour « vingt sept » dit littéralement « seven and twenty » ou écrire « 109 » pour « dix-neuf » dit littéralement « nine-ten » en arabe oral). Nous avons observé 4% d'erreurs liées à l'emploi du nombre « 20 » : elles consistaient à produire le transcodage littéral complet du nombre avec une erreur (mixte) de position dans la pile (*e.g.*, écrire « 105 » pour « 25 » dite littéralement « five and twenty » en arabe). Dans cette erreur, l'enfant a transcodé isolément chaque mot de la chaîne numérique verbale en commettant de plus une erreur de récupération sur le deuxième mot, (récupération de « 10 » au lieu de « 20 »). Les autres erreurs (3% et 2% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie) étaient peu fréquentes et correspondaient respectivement à la suppression d'un chiffre comme écrire « 3 » pour « 23 » dite littéralement « three and twenty » et au transcodage littéral partiel comme écrire « 1005 » pour « 25 » dite littéralement « five and twenty ». Dans cette dernière erreur l'enfant a commencé par transcoder correctement (en écrivant à droite en accord avec son sens d'écriture en arabe) la partie concernant l'unité « 5 » (correspondant à « cinq ») mais en faisant une erreur pour la partie suivante concernant le nombre de dizaine « vingt » qui a été mal transcodé en écrivant « 100 » à gauche au lieu de « 2 ». Nous retrouvons ici les difficultés de transcodage liées à l'énonciation du nombre « 20 » en arabe. Parmi les erreurs lexicales, les erreurs de pile étaient les plus fréquentes et constituaient 74% des erreurs lexicales observées sur cette catégorie (*e.g.*, écrire « 17 » pour « vingt-sept » dite littéralement « seven and twenty » ou « 28 » pour « dix-huit » dite littéralement « eight-ten »). Le reste des erreurs lexicales (15% et 11% respectivement) correspondaient à l'erreur de position dans la pile comme écrire « 74 » pour « 72 » et à la substitution des chiffres (*e.g.*, écrire « 20 » pour « vingt-cinq »).

Concernant les **séparateurs**, l'erreur syntaxique la plus fréquemment produite (31% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie) consistaient à ajouter un zéro (*e.g.*, écrire « 1000 » pour « cent » et « 10000 » pour « mille »). L'erreur correspondant à la suppression de zéro était également fréquente (24% des erreurs syntaxiques sur cette dernière catégorie, *e.g.*, écrire « 100 » pour « mille »). L'inversion constituait 22% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie, *e.g.*, écrire « 0001 » pour « mille » et « 001 » pour « cent »). La suppression de trois zéros constituait 20% des erreurs syntaxiques (*e.g.*, écrire « 1 » pour « mille »). Par contre, la suppression de deux zéros était peu fréquente et constituait 4% des erreurs syntaxiques sur les séparateurs (*e.g.*, écrire « 10 » pour « mille »). Par ailleurs, les erreurs lexicales étaient très peu nombreuses et correspondaient toutes à des erreurs de substitution.

En ce qui concerne les **centaines**, qui présentaient une difficulté spécifique pour les enfants Syriens dont le sens de l'écriture normal contredit le sens d'énonciation de ces nombres, plusieurs types d'erreurs syntaxiques ont été observés. Sur cette catégorie, le type d'erreur le plus fréquent était ce qu'on a appelé « le transcodage littéral complet avec inversion » (l'enfant transcodait littéralement le nombre mais dans le sens de son écriture qui contredit le sens correct de l'énonciation du nombre). Cette erreur est une erreur mixte (syntaxique et lexicale) et constituait seule 25% des erreurs syntaxiques dans cette catégorie (*e.g.*, écrire « 3100 » pour « cent trois », « 13100 » pour « cent treize » et moins fréquemment « 3001 » pour « cent trois »). Le transcodage littéral complet constituait 24% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie [*e.g.*, écrire « 1003 » pour « cent trois »]. Un autre type d'erreur mixte peu fréquent correspondait au transcodage littéral complet avec une erreur de pile (9% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie) comme par exemple écrire « 1003 » pour « cent treize ». Par ailleurs, le transcodage littéral partiel et celui avec une inversion (mixte) constituaient chacun 13% des erreurs syntaxiques observées sur cette catégorie : par exemple, écrire « 2100 » pour « deux cent vingt » dans le cas de transcodage littéral partiel et écrire « 3100 » pour « cent treize » dans le cas de transcodage littéral partiel avec une inversion. Certaines erreurs (7% des erreurs syntaxiques sur les centaines) correspondaient à l'ajout de zéro comme écrire « 2000 » pour « deux cent » et « 2020 » pour « deux cent vingt ». Les erreurs d'inversion constituaient 5% des erreurs syntaxiques sur cette catégorie (*e.g.*, « 301 » pour « 103 »). Le reste des erreurs (environ 3%) consistaient d'une part à supprimer un zéro (écrire « 13 » pour « cent trois ») et d'autre part à supprimer un zéro avec une inversion (*e.g.*, écrire « 62 » pour « deux cent six »).

Les erreurs lexicales observées étaient essentiellement de type « erreurs de pile » (66%) comme écrire « 300 » pour « 103 » (« hundred and three » littéralement) mais il est possible que cette erreur indique aussi une inversion : il se peut que l'enfant ait commencé par écrire les deux zéros (sens d'écriture habituel) puis ait terminé en écrivant le chiffre « trois » à gauche. Le reste des erreurs correspondait à la substitution des chiffres (22%) comme écrire « 310 » pour « 103 », et à l'erreur de position dans la pile (12%), comme écrire « 100 » pour « 200 » (dite littéralement « deux fois cent » en arabe) et « 104 » pour « 103 ».

Comparaison des types d'erreurs dans les systèmes allemand et syrien et français :

Pour résumer, nous avons remarqué qu'à la première année de l'école primaire, la performance de transcodage des enfants Allemands et Syriens (en termes quantitatifs), pour lesquels le système numérique verbal est similaire, ne diffère pas globalement sur les nombres inférieurs à 100. La performance des enfants Français s'approche de celle des enfants Allemands et Syriens pour les nombres inférieurs à « 70 » mais s'éloigne par contre fortement à partir du nombre « 70 » et jusqu'à « 99 ». Les enfants Français rencontrent des difficultés importantes en transcodant ces nombres appelés nombres complexes. Ceux-ci ne posent pas de difficultés spécifiques aux enfants Allemands et Syriens pour lesquels le pourcentage moyen d'erreurs n'a pas progressé sur ces nombres par rapport aux nombres précédents. Les nombres de 11 à 19 étaient plus faciles pour les enfants Allemands que pour les Syriens. Ceci pourrait être dû à l'âge supérieur des enfants Allemands et à la date de passation de l'expérience qui a eu lieu vers la fin de l'année scolaire en Allemagne, ce qui pourrait refléter une période d'apprentissage plus longue et rendre ces petits nombres plus faciles pour eux. En outre, ces nombres ont une énonciation moins transparente par rapport aux nombres DU pour les enfants Syriens (*cf. supra*). Nous avons vu par exemple que les erreurs de pile observées sur ces nombres indiquaient une confusion avec les nombres composés avec vingt (*e.g.*, écrire « 12 » pour « 22 » et « 14 » pour « 24 »). Par contre les erreurs de pile observées sur les autres DU étaient souvent dues à une confusion dans les formes visuelles des chiffres indiens de 6 (٦) et 2 (٢) [par exemple, écrire « 63 » (٦٣) pour « 23 » (٢٣)].

La comparaison entre les deux systèmes numériques allemand et syrien a montré un effet du sens d'écriture ainsi que du sens d'énonciation sur le transcodage. Un nombre important d'erreurs (56% vs 53% des erreurs syntaxiques, 44% vs 39% des erreurs analysées chez les Allemands et les Syriens respectivement) consistait à inverser les chiffres. Les DU énoncés de droite à gauche étaient plus difficiles à transcoder pour les enfants Allemands que les D dont

l'énonciation ne contredit pas le sens d'écriture ($G \rightarrow D$) et donnaient lieu à des erreurs d'inversion des chiffres DU. À la différence des enfants Allemands, les nombres D posaient plus de difficultés aux enfants Syriens puisque l'énonciation de ces nombres contredit le sens d'écriture dans la langue arabe ($G \leftarrow D$) et donnaient lieu à des erreurs de type « inversion des chiffres des dizaines et du zéro ». En outre, les nombres centaines étaient plus difficiles pour les enfants Syriens que pour les Français et les Allemands. Cette difficulté est due à la contradiction entre le sens d'écriture de la langue arabe (de droite à gauche) et l'ordre d'énonciation de ces nombres auquel s'ajoute le fait que l'écriture en chiffres peut être alternée selon les nombres ($G \rightarrow D$, $G \leftarrow D$, $G \rightarrow D$). Les types d'erreurs produits par les enfants Syriens sur ces nombres reflétaient cette difficulté. Ainsi, leur principal type d'erreur correspondait au transcodage littéral complet avec une inversion (comme écrire par exemple « 3100 » pour « 103 ») à la différence des erreurs produites par les enfants Allemands et Français qui correspondaient essentiellement au transcodage littéral mais sans inversion. Globalement les nombres « 100 » et « 1000 » posaient moins de difficulté aux enfants que les nombres composés avec « 100 ». Les types d'erreurs produites par les enfants des trois groupes sur ces nombres correspondaient essentiellement à la suppression ou à l'ajout des zéros.

Discussion

Cette étude avait pour objectif de vérifier l'impact de la structure linguistique et plus particulièrement du sens de l'énonciation du nombre, ainsi que le sens d'écriture, sur la performance de transcodage chez des enfants au début de leur apprentissage scolaire. Pour cela, nous avons suivi une approche interculturelle en comparant le transcodage numérique auprès des enfants Français, Allemands et Syriens en première année de l'école primaire. Notre étude avait également comme perspective de chercher une validation interculturelle (inter-langue) du dernier modèle de transcodage numérique ADAPT_{BASIC} et de proposer les modifications nécessaires pour qu'il puisse rendre compte des spécificités du système numérique verbal dans des différentes langues.

L'ensemble de nos résultats était en accord avec nos prédictions de l'influence des propriétés linguistiques des systèmes numériques verbaux sur le transcodage numérique. Ainsi, les enfants Français dont le système numérique verbal est irrégulier notamment à partir du nombre « 70 », avaient plus de difficultés sur ces nombres par rapport à leurs pairs Allemands

et Syriens. Cette énonciation complexe propre à la langue française perturbe l'accès à l'information concernant la classe lexicale du nombre et retarde par conséquent l'acquisition de la numération chez les enfants Français au début d'apprentissage (*cf.* partie 2). Comme nous avons vu dans la partie 2, leurs erreurs étaient explicables par le modèle ADAPT, ce qui n'était pas le cas avec le modèle de Power & Dal Martello (1990).

Par ailleurs, et conformément à notre hypothèse, pour les enfants Allemands et Syriens, la contradiction entre le sens de l'énonciation de certains nombres et le sens de l'écriture a influencé leur performance de transcodage.

Modèle ADAPT et diversité des systèmes numériques verbaux :

Comme nous l'avons dit précédemment, nous nous intéressons dans la présente étude à vérifier si le modèle ADAPT qui a été validé pour les systèmes de numération anglais et français, est adaptable aux processus de transcodage dans des systèmes numériques verbaux différents et des langues différentes.

Ainsi, suite à l'analyse précédente des erreurs produites par les enfants, nous nous intéressons à savoir si ADAPT peut bien rendre compte de ces difficultés et peut en expliquer l'origine. En effet, la nature des erreurs produites par les enfants Allemands et Syriens sur les nombres DU laisse supposer qu'une production correcte de ces nombres ne reflète pas une compréhension profonde du système positionnel arabe mais bien plutôt l'application de procédures qui ne sont pas sous-tendues par des connaissances conceptuelles. Ceci confirme les prédictions du modèle ADAPT qui postule que le transcodage des nombres du code verbal dans le code digital ne nécessite pas une représentation de la quantité mais l'application de certaines procédures (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 : ADAPT_{BASIC} : procédures de transcodage des nombres jusqu'à 99

Procédure	Condition	Action
Pa	Entrée = unité	Trouver PV en MLT
	Case vide = non	Placer PV en chaîne Arrêter
Pa'	Entrée = unité	Trouver PV en MLT
	Case vide = oui	Placer PV en case vide Arrêter
Pb	Entrée = Dizaine	Trouver PV en MLT
	Case vide = non	Placer PV en chaîne Placer une case vide _ en chaîne Lire l'entrée suivante
Pc	Entrée = dix	Ajouter 1 au nombre en chaîne
	Case vide = oui	Lire l'entrée suivante
Pd	Entrée = particuliers	Trouver PV en MLT
	Case vide = non	Placer 1 en chaîne Placer une case vide _ en chaîne Placer PV en case vide Arrêter
	Case vide = oui	Ajouter 1 au nombre en chaîne Placer PV en case vide Arrêter
Pd'	Entrée = particuliers	Trouver PV en MLT
	Case vide = oui	Ajouter 1 au nombre en chaîne Placer PV en case vide Arrêter
Pe	Entrée = fin	Arrêter
	Case vide = non	
Pe'	Entrée = fin	Remplir case vide avec zéro
	Case vide = oui	Arrêter

Exemple 1

```

« Twenty-five »
- « Twenty » = « dec »
  Frame = no → Pb
  Action : find 2 in LTM
           set frame _ in chain
           read next input
- « Five » = « unit »
  Frame = yes → Pa'
  Action : Find Val= 5 in LTM
           set 5 in empty slot of
           the frame
- End of chain
  Frame = no → Pe
  Action = stop
    
```

PV : valeur positionnelle, MLT : mémoire à long terme

En anglais le transcodage des nombres exige seulement les règles: Pa, Pa', Pb, Pd, Pe et Pe'

Les procédures du modèle ADAPT sont appropriées pour effectuer le transcodage dans les systèmes de numération français et anglais (voir exemple 1) mais elles ne sont pas complètement compatibles avec les langues qui inversent l'ordre d'énonciation des dizaines et des unités ou celles qui ont un sens d'écriture différent (de droite à gauche). Ainsi, pour transcoder un nombre comme « 25 » en français, il faut trois règles selon ADAPT_{BASIC}: la première est la règle Pb qui indique de chercher « 2 » en MLT et placer une case vide à droite de ce chiffre dans la chaîne numérique en construction. Ensuite, une règle Pa' est exigée pour trouver la valeur positionnelle de l'unité « 5 » en MLT et la placer dans la case vide créée par

la règle précédente Pb. Enfin, la règle d'arrêt Pe se déclenche lorsqu'il n'y a plus d'unité à traiter dans la mémoire de travail.

Pour transcoder ce même nombre « 25 » dans le système numérique verbal allemand qui inverse l'énonciation de DU « fünfundzwanzig » (« five and twenty » littéralement), ou dans le système syrien pour lequel le sens d'écriture est en plus inversé, les règles précédentes doivent être modifiées. Nous allons étudier les modifications à apporter à ce modèle afin qu'il puisse rendre compte du transcodage des nombres et des erreurs dans les systèmes numériques allemand et syrien.

Nous rappelons que les deux systèmes numériques allemand et arabe construisent les nombres de façon universelle : les chiffres de l'unité sont toujours les premiers à droite, les chiffres de dizaines se trouvent à gauche de l'unité et les centaines se trouvent encore à gauche des dizaines (C D U) ainsi de suite.

Le système numérique allemand²² :

Comme nous l'avons prédit, les enfants Allemands ont plus de difficultés sur les nombres DU, pour lesquels l'ordre d'énonciation de chiffres est inversé ($G \leftarrow D$) et contredit le sens d'écriture ($G \rightarrow D$), que sur les nombres D. Ces difficultés ont été révélées par la production d'erreurs qui correspondaient essentiellement à l'inversion des chiffres DU. Dans ce genre d'erreur, l'enfant commence par écrire à gauche (sens d'écriture habituel) le chiffre de l'unité qu'il a entendu en premier, puis écrit à droite le chiffre de dizaine énoncé après. L'erreur d'inversion était également produite sur les nombres dizaines (D) dont l'énonciation va dans le sens de l'écriture habituelle ($G \rightarrow D$). Ceci montre que les difficultés rencontrées par les enfants avec l'inversion d'ordre d'énonciation de DU, contaminent parfois les autres structures comme les D. Ces résultats rejoignent ceux de l'étude de Lochy *et al.*, (2003 & 2004), dans laquelle les enfants Autrichiens ont produit beaucoup d'erreurs d'inversion sur les DU. Suite à cette étude, il a été montré qu'une majorité d'enfants a développé une stratégie pour écrire les DU en commençant par écrire le chiffre des unités à droite, puis le chiffre des dizaines à gauche et en généralisant inadéquatement cette stratégie à d'autres structures qui ne sont pas inversées comme les dizaines rondes (« 50 » est produit de droite à gauche en commençant par le zéro, Noël, 2005).

²² Ordre d'énonciation de DU ($G \leftarrow D$), sens d'écriture général ($G \rightarrow D$)

Récemment, une étude de Zuber, J., Pixner, S., Moeller, K., Nuerk, H. (2009) est venue confirmer nos résultats. Cette étude s'intéressait aussi à cette propriété d'inversion d'ordre d'énonciation de DU dans le système numérique verbal Allemand et a porté sur des enfants Autrichiens germanophones dont l'âge moyen est de 7 ans. Soixante-quatre nombres de un, deux et trois chiffres ont été dictés aux enfants. Les auteurs visaient à vérifier les difficultés posées par cette inversion sur la performance du transcodage numérique de ces enfants. Les résultats ont montré que 50% des erreurs produites correspondaient à l'erreur de type inversion comme par exemple écrire « 42 » pour « quatre et vingt littéralement ». Selon les auteurs, ceci était dû à la spécificité du système numérique verbal dans la langue allemande qui inverse l'ordre de l'énonciation des chiffres de dizaines et des unités. Ils ont conclu qu'aucun modèle de transcodage numérique, dans son état actuel, ne peut rendre compte de ce type d'erreurs qui constituait seul la moitié des erreurs produites dans leur étude.

Selon ADAPT, suite à l'encodage de la forme verbale du nombre, un système de « parsing » découpe cette chaîne verbale du début du signal auditif vers la fin. ADAPT suppose que le découpage des formes verbales écrites se fait dans le sens de la lecture qui est de gauche à droite dans la langue allemande. Chaque élément isolé par le système de parsing est stocké temporairement en mémoire de travail pour être ensuite traité séquentiellement par le système de production (les règles de transcodage). Les règles sont constituées des conditions et des actions. Au début de l'apprentissage, selon ADAPT_{BASIC}, il existe deux types de conditions : la nature de l'entrée lexicale (*i.e.*, unité, dizaine,..) et la présence d'une case vide dans la séquence de chiffres en MDT. Pour le système de numération allemand, les conditions et certaines actions des règles de transcodage d'ADAPT_{BASIC} des structures lexicales U, P, D, et DU (Pa, Pb, Pe, Pe', Pd) changent. Les règles Pc et Pd' propres à la numération française ne sont pas incluses (Tableau 3.8).

Tableau 3.8 : ADAPT_{BASIC} du système de numération allemand

Procédure	Condition	Action
Pa	Entrée = unité	Trouver VP en MLT Placer VP en WMS Lire l'entrée suivante
Pb	Entrée = Dizaine	Trouver VP en MLT Placer VP en chaîne Lire l'entrée suivante
Pd	Entrée = particuliers	Trouver VP en MLT Placer VP en WMS Placer 1 en chaîne Lire l'entrée suivante
Pe	Entrée = fin WMS = oui	Placer WMS en chaîne Arrêter
Pe'	Entrée = fin WMS = non	Placer 0 en chaîne Arrêter

Pour illustrer les modifications à apporter sur les règles de transcodage de DU, nous présentons l'exemple de transcodage suivant :

Exemple 2 :
" fünfundzwanzig "

```

« fünfundzwanzig »
→ « five and twenty » *

« Five » = « unit » → Pa
Action : Find VP= 5 in LTM
Set 5 in WMS
Read next input

- « Twenty » = « dec » → Pb
Action : find 2 in LTM
Set 2 in chain
Read next input

-End of chain → Pe
WMS = yes → set WMS (5) in chain
→ 25
stop → 25
    
```

Comme nous pouvons le constater, en allemand le nombre de règles exigées pour le transcodage de « 25 : fünfundzwanzig » (littéralement « five and twenty »), est identique à son transcodage en français mais les conditions et les actions des règles sont différentes. En allemand, le transcodage de ce nombre demande l'application de 3 règles : Pa, Pb et Pe (Tableau 3.8). La règle Pa responsable du transcodage de l'unité aura l'action « placer VP en WMS » en allemand (au lieu de « placer VP en chaîne » en français) et « lire l'entrée

suivante » (au lieu de « arrêter »). Puisque dans un nombre DU en allemand l'énonciation de l'unité précède celle de la dizaine. La règle Pb est déclenchée lorsque l'entrée lexicale correspond à une dizaine. Cette règle récupère la valeur positionnelle de dizaine (twenty) en MLT et la place en chaîne (2). La règle d'arrêt Pe est déclenchée lorsque la chaîne numérique verbale est finie, à condition qu'il y ait une valeur en WMS. Cette règle appliquera les actions « placer WMS en chaîne » (« 5 » dans l'exemple) et « arrêter ».

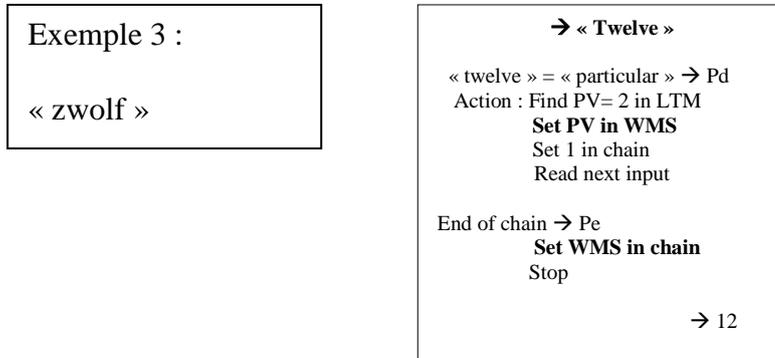
Imaginons que l'enfant applique l'action « placer VP en chaîne » de la règle Pa au lieu de l'action « placer VP en WMS », dans ce cas, il va placer la valeur positionnelle de l'unité récupérée (« 5 ») en chaîne directement. Ensuite il va appliquer la règle Pb, donc il récupère la valeur positionnelle de « twenty » qui est (2) et il la place en chaîne à côté de 5 → 52. À ce stade là, il y a deux possibilités d'erreurs : Si l'enfant s'arrête à la dernière étape (récupérer la valeur positionnelle de « twenty » et la placer en chaîne) alors le nombre produit est inversé (au lieu d'écrire « 25 » il écrit « 52 ») et s'il applique la règle Pe' (placer « 0 » en chaîne à condition qu'il n'y ait pas une valeur dans WMS) il peut écrire « 520 » ce qui correspond à un transcodage littéral complet. Cette dernière erreur est sous-tendue par une faible connaissance de la syntaxe du nombre, c'est-à-dire que l'enfant ne réalise pas que c'est un nombre à deux chiffres. Les résultats ont montré que les erreurs des enfants Allemands sur les DU étaient en grande majorité de type inversion tandis que les erreurs correspondant au transcodage littéral complet étaient peu fréquentes.

Ainsi, et à la différence des enfants Français, les enfants Allemands ont besoin, en plus, de recourir à la mémoire de travail pour garder la valeur positionnelle récupérée et continuer en même temps le traitement de la chaîne numérique verbale. Ceci constitue une charge mémorielle qui peut être une source de difficulté pour les enfants Allemands et les amener à produire plus d'erreurs sur ces nombres (DU).

Une stratégie d'écriture en chiffres qui peut être développée par certains enfants pour transcoder les nombres DU consiste à commencer par écrire à droite le chiffre de l'unité énoncé en premier, puis ensuite écrire à gauche le chiffre de dizaine, tout en inversant sur le plan spatial, le sens d'écriture habituel. Cette stratégie constitue une étape subséquente aux erreurs d'inversion, puisque la connaissance de ce que sont la dizaine et l'unité, en termes de position au sein de nombres à deux chiffres, semble y transparaitre. Dans ce cas là, au lieu de garder en mémoire la valeur positionnelle de l'unité en continuant le transcodage de l'entrée suivante (dizaine), l'enfant peut l'écrire en laissant un espace à gauche pour écrire la dizaine

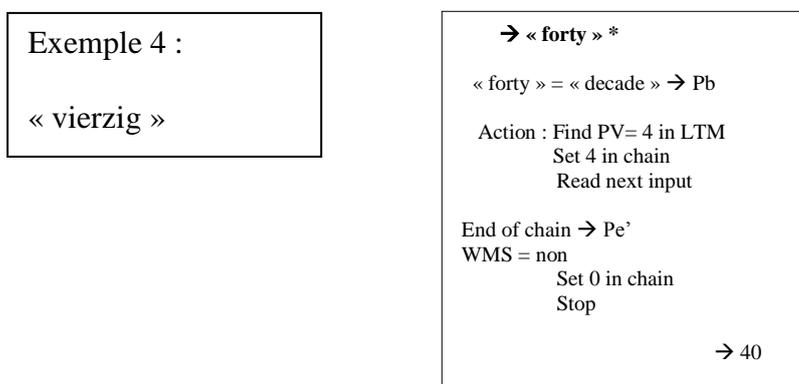
après. Une telle stratégie de transcodage peut alléger la charge mémorielle et facilite le transcodage de ces nombres (DU).

Prenons maintenant l'exemple d'un « particulier » :



On trouve peu d'erreurs pour ces nombres qui relèvent vraisemblablement d'un apprentissage par cœur.

Le modèle rend également compte de l'écriture des dizaines entières :



Un type d'erreur assez fréquent consistant par exemple à écrire « 14 » au lieu de « 40 » - erreur classée comme erreur de pile - pourrait provenir d'une confusion entre les énonciations des nombres de treize à dix-neuf avec les nombres entiers de dizaines (e.g., «14 : vierzehn » vs « 40 : vierzig »).

Une autre erreur également fréquente consistant à inverser unités et dizaines (« 04 » au lieu de « 40 ») peut être expliquée par une contamination des erreurs produites pour les nombres DU.

Le système numérique Syrien ²³:

Conformément à nos attentes, les enfants Syriens avaient des difficultés sur les nombres D pour lesquels l'ordre d'énonciation de chiffres, c'est-à-dire une énonciation qui commence par l'unité (ex : khams) et est suivi temporellement par la marque des dizaines (-oon), contredit le sens d'écriture de la langue arabe ($G \leftarrow D$), tandis que, et contrairement aux enfants Allemands, l'inversion d'ordre d'énonciation des nombres DU ne leur posait pas des difficultés puisqu'elle ne contredit pas leur sens d'écriture. Toutefois, comme c'était le cas avec les enfants Allemands, cette inversion a contaminé parfois les autres structures comme les DU pour lesquels l'enfant Syrien n'a pas besoin de changer le sens d'écriture pour les transcoder en chiffres.

L'énonciation des nombres DU en arabe commence par l'unité suivie par la dizaine comme en allemand mais cette énonciation ne contredit pas le sens d'écriture de la langue arabe ($G \leftarrow D$). Ainsi, les règles exigées pour le transcodage de ces nombres seraient différentes des règles allemandes et françaises, notamment en ce qui concerne le rôle de la mémoire de travail (WMS). Pour ces nombres DU, le découpage de la chaîne numérique verbale s'effectue donc de droite à gauche. L'exemple suivant illustre les modifications nécessaires pour le transcodage d'un nombre DU dans le système numérique syrien (ou plus généralement dans la langue arabe).

<p>Exemple 5 :</p> <p>« khamsa wa ishroon »</p>	<p style="text-align: center;">« Twenty-five » → « Five and twenty »</p> <p>- « Five » = « unit » → Pa Action: Find PV= 5 in LTM Set 5 in chain Read next input</p> <p>-« Twenty » = « decade » Chain = yes → Pb Action: find 2 in LTM Set 2 in chain Read next input</p> <p>- End of chain Frame = no → Pe Action = stop</p> <p style="text-align: right;">→ 25</p>
---	--

²³ Ordre d'énonciation de DU ($G \leftarrow D$), sens d'écriture général ($G \leftarrow D$)
Ordre d'énonciation de D ($G \rightarrow D$)

Comme le montre l'exemple 5, la première entrée lexicale définie par le parsing sera l'unité (five). Ainsi la règle nécessaire à son transcodage selon ADAPT_{BASIC} sera la règle Pa responsable de récupérer la valeur positionnelle en MLT et la placer en chaîne. Elle sera suivie de l'action « lire l'entrée suivante ». La deuxième entrée lexicale est la dizaine « twenty ». Selon ADAPT la règle responsable du transcodage de la dizaine en français est Pb. A la différence du français, cette entrée est énoncée en second ce qui modifiera les conditions de déclenchement de la règle Pb puisqu'une valeur est déjà placée en chaîne par la règle Pa. Une autre condition sera ajoutée qui est l'existence d'une valeur dans la chaîne numérique en construction. Cette condition sera suivie d'une action « lire l'entrée suivante » après la récupération de la valeur positionnelle et son placement en chaîne. Une erreur potentielle ici peut être de mal placer la valeur positionnelle de la dizaine, c'est-à-dire, la placer à droite de l'unité au lieu de la placer à gauche. Ce qui amène à produire une erreur de type inversion (e.g., écrire « 52 » pour « 25 »). Un autre type d'erreur peut être de récupérer une mauvaise valeur positionnelle de la dizaine (e.g., écrire « 35 » pour « 25 ») ce qui donne une erreur de type pile. Nos résultats ont montré que ces types d'erreurs étaient les plus fréquents parmi les erreurs lexicales observées sur les DU chez les enfants Syriens. Par ailleurs, si la règle Pb se déclenche sans que la nouvelle condition « valeur dans la chaîne numérique en construction » soit prise en considération, une erreur syntaxique sera produite. Cette dernière erreur serait due à l'application des règles Pb' (cf. *infra*) responsable du transcodage de la dizaine entière qui amène à écrire le nombre dizaine énoncé entièrement (e.g., « 205 »). Nous avons observé moins fréquemment ce type d'erreur correspondant au transcodage littéral complet.

La règle Pb précitée permettrait de transcoder les dizaines entières (énoncé après l'unité) dans le système syrien. Ces nombres, énoncés seules - par exemple « 50 = khamsoon » littéralement « fifty » - nécessitent une nouvelle règle appelée Pb'.

<p>Exemple 6</p> <p>« khamsoon »</p>	<p>« Fifty »</p> <p>- « Fifty » = « decade » chain = no → Pb' Action: Find PV = 5 in LTM Set 5 in chain Set 0 on the right Read next input</p> <p>- End of chain → Pe Action = Stop</p> <p style="text-align: right;">→ 50</p>
--------------------------------------	--

Les conditions de déclenchement de cette règle Pb' sont différentes de celles de la règle Pb. Pour cette règle Pb', les conditions de déclenchement sont : la nature de l'entrée lexicale « dizaine » et « l'absence d'une valeur en chaîne ». Ainsi, puisque l'écriture et la lecture en arabe se fait de droite à gauche et que l'énonciation d'un nombre dizaine commence par l'unité (ex : khams) et est suivi temporellement par la marque des dizaines (-oon), la première action à appliquer par la règle Pb' sera « trouver la valeur positionnelle en MLT » donc « 5 ». Viennent ensuite les autres actions responsables de placer cette valeur en chaîne, « placer 0 à droite » et lire l'entrée suivante. Enfin, la règle Pe, se déclenche pour arrêter (50).

Les erreurs potentielles peuvent être les suivantes : la valeur positionnelle du nombre dizaine récupérée en MLT (« 5 » dans l'exemple) est placée en chaîne mais l'action « placer zéro à droite » échoue et le traitement s'arrête à cette étape, alors « 50 » sera transcodé comme 5. Cette erreur était la plus fréquente sur les D comme l'ont montré nos résultats et elle était classée comme erreur de pile. Autre possibilité : la valeur positionnelle du nombre dizaine récupérée en MLT (« 5 » dans l'exemple) est placée en chaîne mais l'action « placer zéro à droite » est mal appliquée et le zéro est placé à gauche (ce qui correspond au sens d'écriture dans la langue arabe et est conforme à l'ordre d'écriture des nombres DU). Dans ce cas, l'erreur produite correspond à l'inversion des chiffres de dizaines et des unités (05). Cette erreur était également fréquente sur les D. On peut également noter la difficulté d'emploi du zéro comme marqueur positionnel (Noël, 2005) qui peut conduire à produire d'autres erreurs de pile assez fréquentes comme écrire « 55 » au lieu de « 50 » en complétant la case vide par la même valeur positionnelle récupérée au lieu de « 0 ».

Nous avons postulé que le transcodage du nombre « 20 » : « ishroon » en arabe amenait à produire des erreurs de nature différente de celles produites sur les autres dizaines (*cf. supra*). Ceci serait dû à son énonciation. Ce nombre est énoncé « ishroon » (littéralement « ten - oon ») ce qui ne facilite pas l'accès à la valeur positionnelle du nombre « 20 » (2^{ème} position dans la pile des dizaines). Ainsi, plusieurs erreurs syntaxiques ont été produites sur ce nombre comme écrire « 100 » par exemple. Dans cette erreur, qui présente un transcodage littéral complet, la valeur positionnelle de « 20 » était inaccessible et était remplacée par « 10 » (10_) qui est énoncé avant le suffixe (- oon) indiquant la dizaine. La case vide était ensuite complétée par 0 (100). Quelques autres erreurs sur ce nombre étaient d'écrire « 1010 ». On rejoint l'explication précédente sur la difficulté de zéro (1010). De telles erreurs n'étaient pas observées chez les Allemands ni les Français qui n'ont pas cette énonciation du nombre « 20 ».

Pour résumer, dans le système de numération syrien, seulement la règle de transcodage d'ADAPT_{BASIC} concernant l'unité (Pa) reste sans modification avec la règle d'arrêt (Pe) tandis que les règles exigées pour le transcodage des nombres D et DU seraient modifiées (Tableau 3.9).

Tableau 3.9 : ADAPT_{BASIC} du système de numération syrien

Procédure	Condition	Action
Pa	Entrée = unité	Trouver VP en MLT
		Placer VP en chaîne
		Lire l'entrée suivante
Pb	Entrée = Dizaine	Trouver VP en MLT
	Chaîne = oui	Placer VP en chaîne
		Read next input
Pb'	Entrée = Dizaine	Trouver VP en MLT
	Chaîne = non	Placer VP en chaîne
		placer 0 à droite
		Lire l'entrée suivante
Pe	Entrée = fin	Arrêter

Quant aux nombres supérieurs à 100 qui ne font pas partie de l'enseignement systématique au niveau scolaire étudié, nous avons prédit qu'en début d'apprentissage, ces nombres peuvent poser davantage de difficultés spécifiques du transcodage que dans la langue allemande. Conformément à nos prédictions, les enfants Syriens ont montré une grande difficulté en transcodant les nombres à partir de 100. Ces nombres ont globalement un sens d'énonciation et d'écriture en chiffres qui va de gauche à droite, donc contre le sens d'écriture en arabe mais alterne parfois dans le même nombre. Par exemple «125 » est énoncé « hundred and five and twenty » ($G \rightarrow D$, $G \leftarrow D$). Lors du transcodage des grands nombres, cette alternance qui vient de l'énonciation de DU devrait être moins importante pour les enfants Allemands que pour les enfants Syriens. Selon ADAPT, avec l'apprentissage, les petits nombres comme les DU seraient mémorisés et leur transcodage ne nécessiterait plus l'application de plusieurs règles mais une récupération directe de la forme en chiffres en MLT. Ce qui fait que cette inversion d'énonciation n'aurait pas autant d'influence sur l'écriture de ces nombres au sein d'un grand nombre. Tandis que pour les enfants Syriens, même si le transcodage de ces petits nombres est mémorisé (automatisé), le sens d'écriture en chiffres des grands nombres contredit toujours le sens de l'écriture en arabe et nécessite l'apprentissage de certaines règles. Nos

résultats ont montré que les nombres supérieurs à 100 étaient plus difficiles à transcoder par les enfants Syriens que les Allemands. Les erreurs produites par les enfants Allemands sur ces nombres correspondaient essentiellement au transcodage littéral complet (e.g., écrire « 10013 » pour « 113 ») ce qui montre qu'ils ne disposaient pas encore des règles nécessaires pour transcoder ces nombres. La nature des erreurs produites par les enfants Syriens sur ces nombres montrait de plus une difficulté liée au changement du sens d'écriture (e.g., écrire « 13100 » pour « 113 »). En allemand, les nombres séparateurs « 100 » et « 1000 » nécessitent les mêmes règles de transcodages (P2a, P3a et P4b) qu'en français (cf. ADAPT_{ADV}, partie 1.2). En arabe, ces nombres demandent certaines modifications des règles P2a et P3a proposées dans ADAPT_{ADV}. Pour les enfants **Syriens**, les nombres « cent » et « mille » s'écrivent de gauche à droite, ce qui contredit le sens habituel d'écriture dans la langue arabe. Ainsi, la règle nécessaire pour son transcodage doit prendre en considération ce changement du sens d'écriture. L'exemple suivant illustre la modification à apporter à la règle P2a :

Exemple 7	« Hundred » → « Mia »	« Thousand » → « Alf »
« Mia » : 100 « Alf » : 1000	<pre> - « Hundred » = « mia » Frame = no → P2a WMS = no Action: Set 1 in chain Set frame_ _ on the right Read next input → 1_ _ - End of chain WMS = no Frame = yes → P4b Action = Fill empty slots with 0s Stop → 100 </pre>	<pre> - « Thousand » = « Alf » Frame = no → P3a WMS = no Action: Set 1 in chain Set frame - - - on the right Read next input → 1 - - - - End of chain WMS = no Frame = yes → P4b Action = Fill empty slots with 0s Stop → 1000 </pre>

Nous pensons que pour transcoder ce nombre en arabe, une précision du sens du placement des cases vides est nécessaire à porter sur la deuxième action de la règle P2a. C'est à dire, que l'action « placer deux cases vides » qui suit l'action « placer 1 en chaîne » dans le modèle français, doit être remplacé par « placer deux cases vides à droite » dans la langue arabe et d'autres langues dont le sens d'écriture est (G ← D). Ce qui doit être particulièrement difficile pour les enfants Syriens parce que cela contredit l'ordre d'écriture des DU (G ← D). Une démarche similaire sera nécessaire pour transcoder « 1000 » (Exemple 7). De même que pour les autres règles d'ADAPT_{ADV}, les cases vides devraient être placées en chaîne à droite du « 1 » du nombre centaine ou millier, avant toute autre action.

Conclusion :

La présente étude avait pour but de vérifier l'impact de la structure linguistique ainsi que le sens d'écriture sur le transcodage des nombres au début de l'apprentissage scolaire. Un deuxième objectif était de chercher une validation interculturelle (inter-langue) du dernier modèle de transcodage numérique ADAPT_{BASIC} et de proposer les modifications nécessaires qui lui permettront d'expliquer le transcodage dans des systèmes numériques verbaux différents et lorsque le sens de l'écriture change.

Comme nous l'avons vu, l'énonciation du nombre et le sens d'écriture ont une influence sur son transcodage en chiffres. Plus l'énonciation est transparente et reflète la structure du nombre plus son transcodage est facile. En outre, une contradiction entre l'ordre d'énonciation et le sens d'écriture rend le transcodage plus difficile et plus exigeant soit au niveau de la mémoire soit des procédures à employer.

Les résultats nous ont permis aussi de montrer qu'un modèle de transcodage asémantique procédural est capable de rendre compte du transcodage dans des différentes langues avec certaines modifications de ses procédures. Par contre un modèle sémantique est capable d'expliquer le transcodage dans les systèmes numériques verbaux transparents comme dans le japonais et le chinois, mais il est limité dans les autres systèmes moins transparents.

4

APPROCHE DIFFERENTIELLE

4. Étude du transcodage des nombres et différences individuelles en mémoire de travail – chez des enfants français de (CP) et de (CE1)

Introduction

A la différence des modèles de transcodage qui le précèdent qui n'intègrent pas des processus cognitifs non-numériques, le modèle ADAPT implique différentes structures du système cognitif, nécessaires à la tâche de transcodage comme la mémoire de travail (MdT) et la mémoire à court terme (MCT ou « Buffer » dans le modèle). Nous rappelons que ce modèle suppose que des composants spécifiques au système de transcodage (comme le parsing, le système de production ou encore le registre des formes en mémoire à long terme) utilisent des composants non spécifiques du système cognitif, comme par exemple la mémoire phonologique à court terme ou encore la mémoire de travail.

La notion de mémoire de travail (MdT):

La mémoire de travail est impliquée dans de nombreux processus cognitifs. De nombreuses activités cognitives quotidiennes (lire un article dans le journal, calculer la somme due pour un repas au restaurant, etc.) impliquent souvent le maintien temporaire d'informations alors que des opérations mentales sont effectuées simultanément. Ainsi, le concept de mémoire de travail (Atkinson & Shiffrin, 1968 ; Baddeley & Hitch, 1974) a peu à peu remplacé celui de mémoire à court terme comme système de stockage unitaire passif. Elle est considérée comme un système actif fortement sollicité dans les apprentissages complexes comme dans la compréhension, la lecture, le raisonnement, la résolution de problèmes arithmétiques. Elle sert à stocker temporairement des informations dans le but de les réutiliser peu de temps après dans un contexte particulier comme comprendre une phrase, écrire une phrase entendue, faire des calculs...etc. Ainsi, les limitations manifestes de la pensée humaine dans ces activités cognitives ont été attribuées aux capacités limitées de la mémoire de travail. Les différences interindividuelles de la capacité de MdT sous-tendent une part importante des variations observées entre les individus dans ces activités et sur des tests d'évaluation des compétences linguistiques et mathématiques (Gathercole & Pickering, 2000; Gathercole, Pickering, Knight

& Stegmann, 2004; Lépine, Barrouillet & Camos, 2005) et de raisonnement (Barrouillet & Lecas 1999). En outre, lorsque celle-ci est observée chez les enfants en développement, la MdT est responsable des différences de performances scolaires observées entre les enfants souffrant ou non de troubles d'apprentissage (Barrouillet, Camos, Morlaix & Suchaut, 2008; Bull, Johnston & Roy, 1999; Bull & Scerif, 2001; Geary, Brown, & Samaranayake, 1991; Geary, Hoard, & Hamson, 1999; McLean & Hitch, 1999). L'impact des différences individuelles de capacité en MdT est souvent évalué dans des tâches cognitives de haut niveau. Ces tâches impliquent un traitement à multiples étapes dont la durée et l'efficacité de chacune détermine la performance finale. Cependant, ces activités de récupération et de stockage des informations sont nécessaires même dans des tâches cognitives simples comme le transcodage des nombres. Ainsi le transcodage des nombres de leur forme verbale en leur forme numérale serait aussi affecté par les différences individuelles en MdT qui conduiraient à une performance supérieure chez ceux qui ont une bonne capacité de MdT. Cette influence devrait être notable chez les enfants au début de l'apprentissage du transcodage où chaque étape de traitement peut être coûteuse et le coût cognitif général est donc plus élevé.

Modèle de mémoire de travail :

Baddeley (1986) définit la MdT comme un système de maintien temporaire et de manipulation de l'information, nécessaire pour réaliser des activités cognitives quotidiennes (*e.g.*, compréhension du langage, lecture, apprentissage, raisonnement...). Selon Baddeley et Hitch (1974), la MdT est composée d'un *administrateur central* qui contrôle et coordonne les activités de traitement de systèmes esclaves. Ces systèmes esclaves sont *la boucle phonologique* qui gère le stockage des informations verbales et *le calepin visuo-spatial* qui permet le stockage à court terme des informations visuelles et spatiales. L'administrateur central gère le passage des informations entre ces sous-systèmes et la mémoire à long terme. Il prend en charge les fonctions exécutives telles que la planification, l'inhibition, la récupération d'informations et plus généralement, il contrôle la quantité de ressources attentionnelles allouées par le sujet à une tâche donnée. En (2000) Baddeley a ajouté un autre système esclave à son modèle, *le buffer épisodique*. Ce système a comme fonction de lier les informations provenant de plusieurs domaines pour former une seule unité intégrant les informations visuelles, spatiales et verbales dans un ordre chronologique comme la mémoire d'une histoire ou d'une scène d'un film.

Cette idée du rôle éventuel de la mémoire de travail en transcodage a été développée par Fayol, Barrouillet et Renaud (1996) [voir également Jarlegan *et al.* 1996] et plus récemment par Barrouillet *et al.* (2004) dans le modèle ADAPT. Fayol, Barrouillet et Renaud (1996) ont étudié le transcodage du code verbal en code arabe portant sur des nombres de 2 à 6 chiffres chez des adolescents suivant ou non une scolarité normale. Les résultats ont montré que les problèmes provenaient essentiellement de la longueur phonologique des formes orales (évaluée en nombre de syllabes) et de la taille des nombres arabes en nombre de chiffres. Ces données ont permis d'envisager la possibilité de traiter le transcodage dans le cadre d'un modèle de mémoire de travail qui serait soumis à des contraintes de stockage et de traitement simultanément. Un tel modèle aurait l'avantage d'intégrer les faits rapportés dans la littérature neuropsychologique qui relève un effet de la taille du nombre chez plusieurs patients ; plus le nombre de chiffres est grand, plus les erreurs de transcodage sont fréquentes (Cipolotti & Butterworth, 1995; Delazer & Denes, 1998; Noël & Seron, 1995). En outre d'intégrer ces faits rapportés en neuropsychologie, un tel modèle peut permettre d'interpréter les résultats de ceux qui émanent de recherches sur le développement (Power & Dal Martello, 1990; Seron, Deloche & Noël, 1991; Sullivan, Macaruso & Sokol, 1996).

A l'image du modèle ACT-R d'Anderson (1993), ADAPT est un système procédural impliqué dans l'architecture générale du système cognitif. Ainsi le transcodage sera influencé non seulement par la nature procédurale du système mais aussi par des contraintes cognitives générales. Son efficacité dépend donc du coût cognitif du fonctionnement du système qui est déterminé par le nombre des règles exigées par le transcodage. Selon ADAPT, suite à l'encodage de la forme verbale du nombre, le système de parsing découpe la chaîne numérique verbale en unités et les stocke temporairement en MdT. Ces éléments seraient traités ensuite l'un après l'autre par le système de production composé de règles « condition-action ». Une règle est déclenchée lorsque le contenu actuel de la MdT correspond à ces conditions de déclenchement. Ainsi certaines règles permettent de récupérer la forme en chiffres en MLT et de la placer en MdT. D'autres règles ont pour charge de gérer la longueur de la chaîne numérique en chiffres et le nombre de cases vides ainsi que le positionnement des zéros. Ce système de production est donc en constante interaction avec la mémoire de travail qui constitue un système médiateur entre les informations venant de l'extérieur (la chaîne numérique verbale) et les informations venant de la mémoire à long terme (les connaissances déclaratives, les formes en chiffres). Durant le déroulement du processus de transcodage, la mémoire de travail contient les unités verbales isolées par le parsing, des représentations des

connaissances récupérées en mémoire à long-terme (les formes en chiffres correspondantes) et des représentations construites par l'application des règles du système de production. Ainsi, vu que la quantité des informations à maintenir actives pendant les traitements peut être importante, la capacité de la mémoire de travail peut constituer une contrainte importante dans le transcodage. Une dégradation de la mémoire phonologique à court terme ou de la mémoire de travail pourrait avoir un impact sur les processus de transcodage.

Prenons l'exemple du patient L.R. rapporté par Noël et Seron (1995). Ce patient âgé de 71 ans souffrait de troubles de la mémoire, notamment la mémoire à court terme, et de l'attention. Il montrait des difficultés spécifiques dans une tâche de transcodage des nombres (de verbal en chiffres). Il produisait des erreurs de type transcodage littéral partiel sur les nombres à 3, 4 et 5 chiffres (plus un nombre contenait des chiffres, plus ces erreurs étaient nombreuses) comme par exemple écrire « 48000914 » pour « quarante huit mille neuf cent quatorze ». Selon ADAPT ces erreurs pourraient provenir du coût cognitif élevé provoqué par le maintien de l'information phonologique, par les processus de récupération en mémoire à long-terme, l'application des règles et le maintien en mémoire de travail de la chaîne numérique en construction (résultat de l'application des règles). Cette surcharge cognitive augmente avec la taille des nombres à transcoder et conduirait au découpage de la chaîne numérique verbale en blocs dont les transcriptions se trouvent concaténées (dans l'exemple précédent, « quarante huit mille neuf cent quatorze » serait segmenté en « quarante huit mille » et « neuf cent quatorze »). Ainsi, lorsque la charge cognitive dépasse l'empan mnésique de L.R., le transcodage est temporairement suspendu. L'écriture de la chaîne qui vient d'être construite permet de vider la mémoire de travail, le coût cognitif diminue donc et le traitement reprend.

Cet exemple montre que la capacité de la mémoire de travail a un impact sur le transcodage chez un adulte qui a déjà acquis les règles de transcodage mais qui a des capacités mémorielles faibles. Cet impact de capacité de MDT sur le transcodage a également été montré récemment chez les enfants (Camos , 2008 ; Zuber *et al*, 2009)

La première étude conduite par Camos (2008) s'est intéressée à l'impact des différences individuelles en mémoire de travail sur le transcodage des nombres chez des enfants, en utilisant le modèle ADAPT comme référence. Soixante-huit nombres de 1 à 4 chiffres (dont 50 nombres de 4 chiffres) ont été dictés à des enfants français scolarisés en deuxième année d'école primaire (CE1 : âge moyen = 7 ans). La capacité de la mémoire de travail des enfants

a été évaluée à l'aide d'un test de « counting span ». Les résultats de cette étude ont confirmé les prédictions d'ADAPT : plus faible était la capacité de la mémoire de travail et plus un nombre nécessitait de règles pour son transcodage, plus le taux d'erreurs était élevé. Les erreurs produites étaient en majorité syntaxiques. Cinq types d'erreurs ont été décrits (l'ajout des zéros, l'ajout de 1, suppression d'un chiffre, substitution d'un chiffre et erreurs complexes correspondaient à l'ajout de plusieurs zéros après 1000 ou 100 et éliminer un chiffre en même temps). Une différence a été observée entre les enfants qui ont une faible capacité de MdT et ceux qui ont une capacité élevée en transcodant les nombres de 3 et de 4 chiffres. Cette différence portait sur le nombre d'erreurs produites pour les nombres à 3 chiffres alors qu'elle concernait le nombre et les types d'erreurs produites pour les nombres à 4 chiffres (Camos, 2008, p 53).

Zuber, Pixner, Moeller et Nuerk (2009) de leur part ont cherché à étendre l'étude de Camos (2008) et se sont intéressés à l'impact de la mémoire de travail sur le transcodage de la forme verbale du nombre dans sa forme en chiffres dans le système numérique verbal allemand qui inverse l'énonciation de DU. Dans la mesure où les modèles de MdT montrent qu'elle ne constitue pas un système unitaire (Conway, Jarrold, Kane, Miyake & Towse, 2007), les auteurs se sont intéressés à savoir quelles composantes de la mémoire de travail influençaient le plus le transcodage. Pour cela, et à la différence de Camos (2008), ils ont utilisé des tâches non-numériques pour tester les capacités de la mémoire de travail (MdT verbale « letter repetition », MdT Visio-spatiale) et mesuré le Quotient Intellectuel (QI) des sujets. Leur étude a porté sur des enfants Autrichiens parlant allemand en première année d'école primaire (âge moyen de 7 ans). Les résultats ont montré que l'inversion d'énonciation de DU dans le système allemand posait une difficulté de transcodage pour ces enfants et amenait à produire des erreurs d'inversion de DU. En outre, ils ont remarqué que différentes composantes de la mémoire de travail corrélaient de façon différente avec certains types d'erreurs de transcodage. Une influence de l'administrateur central sur les erreurs d'inversion a été observée ainsi qu'une influence de la mémoire visio-spatiale sur certaines erreurs syntaxiques comme le transcodage littéral complet.

Dans la présente étude, nous chercherons à vérifier l'impact des capacités mémorielles sur le transcodage et sur l'acquisition des règles chez les enfants au début de l'apprentissage scolaire, en nous référant au modèle ADAPT (Barrouillet *et al*, 2004). Nous analyserons ici la version ADAPT_{BASIC} qui décrit les règles de transcodage au début de l'apprentissage.

Comme le suggère ADAPT_{BASIC}, nous supposons que les capacités de MdT ainsi que le stockage et la récupération en MLT influencent l'efficacité du transcodage algorithmique. Plus le transcodage exige de règles (donc mobilise d'étapes), plus le coût cognitif du traitement est élevé et plus la MdT est sollicitée. On devrait noter un haut niveau d'erreurs de transcodage lorsque la capacité de la mémoire de travail est faible car une capacité limitée en MdT peut affecter chaque étape du traitement. On devrait également noter un effet de la capacité de la MdT sur la transcription de nombres selon la longueur de la chaîne verbale servant à l'énoncer. Plus la chaîne verbale est longue, plus la mémoire de travail sera sollicitée ; les enfants présentant un faible empan en MdT devraient produire plus d'erreurs que les enfants présentant un empan élevé. Dans la mesure où la capacité de la mémoire de travail se développe avec l'âge (*cf.* Case, 1985, 1992; Halford, 1993; Pascual Leone, 1988), nous devrions observer une augmentation de cette capacité entre les élèves de CP et ceux de CE1. Nous faisons l'hypothèse que les enfants ayant une faible capacité de MdT produiront plus d'erreurs que les enfants qui ont une capacité élevée et ce, hors effet de l'âge de l'élève. Plus la nature des erreurs devrait différer d'un groupe à l'autre (H = empan élevé vs L = empan faible), notamment pour l'écriture des nombres nécessitant un nombre élevé de règles, l'implication de la MdT étant ici très importante. Plus faible est la capacité de la mémoire de travail et plus un nombre nécessite de règles pour son transcodage, plus le taux d'erreurs serait élevé.

En ce qui concerne les types d'erreurs, il y a deux possibilités. Selon la première, si les deux groupes de mémoire ont le même niveau d'apprentissage (acquis les mêmes règles de transcodage), alors une limite de la capacité de MdT devrait ralentir le processus de récupération et l'application des règles en augmentant l'oubli des formes en chiffres. Ceci pourrait donc affecter l'efficacité du transcodage mais sans nécessairement conduire à produire différents types d'erreurs. Selon la deuxième possibilité, si les deux groupes n'ont pas atteint le même niveau d'apprentissage des règles de transcodage, leurs erreurs de transcodage pourraient donc différer en quantité et aussi en qualité (type d'erreurs). Dans ce dernier cas, les différences individuelles de MdT peuvent être responsables de ces différences en n'affectant pas seulement l'efficacité du transcodage mais aussi en retardant l'acquisition des règles.

Méthode

Participants

Un échantillon de 33 enfants de classes de CP et 39 de CE1, scolarisés dans deux écoles de l'agglomération dijonnaise, ont participé à notre étude (dont 17 filles pour chaque niveau de classe). L'âge moyen de l'échantillon était pour les CP de 6 ans et 5 mois (écart-type de 3 mois) et de 7 ans et 5 mois (écart-type de 4 mois) pour les enfants de CE1. Sur le plan pédagogique, les participants suivaient tous une scolarité normale. Du point de vue de leur origine sociale, l'échantillon appartient à des milieux sociaux divers et a le français comme langue maternelle.

Matériel

1. DICTEE DES NOMBRES

Le matériel était composé de quatre grilles de 16 cases remises à l'enfant lors de l'expérience. Chaque grille comportait deux colonnes de 8 images différentes par colonne. Pour écrire le nombre dicté, l'enfant disposait d'un espace blanc laissé à côté de chaque image.

La liste dictée est composée de 64 nombres répartis selon leur composition ou leur complexité en unités (U), particuliers (P) de 11 à 15, dizaines simples (Ds) de 10 à 60 et complexes (Dc) 70, 80 et 90, ainsi que des nombres composés en dizaine-unité simple (DU) ou complexe (Duc). Etaient aussi dictés le nombre « 100 », le nombre « 1000 » et 18 nombres contenant « cent » appelés « centaines » (Annexe 7). La dictée se faisait dans deux ordres aléatoires différents

2. TESTS DE MEMOIRE

Trois tests différents ont été utilisés pour tester la mémoire de travail des participants (*cf.* annexe 8, 9 et 10) :

L'empan de chiffres, un subtest de la WISC-III (Wechsler Intelligence Scale for Children), utilisé en ordre direct puis en ordre inverse, le « **Listening Span** », test consistant à compléter le dernier mot figurant dans chaque phrase présentée et à retenir ce mot [Exemple : En automne, les arbres perdent leurs ... (feuilles), Le pain est vendu dans une (boulangerie),

RAPPEL : feuilles, boulangerie] et le test « **Mémoire de Mots** » avec support imagé du K-ABC (Kaufman Assessment Battery for Children) de Kaufman & Kaufman (1993).

Les réponses des enfants étaient recueillies à l'oral et inscrites par l'expérimentateur sur une grille prévue à cet effet. Pour le test d'empan de chiffres et de mots, les réponses attendues de l'enfant figuraient préalablement sur la grille de correction. L'expérimentateur en pointait les bonnes réponses ou notait les réponses de l'enfant afin de comparer et calculer directement les scores. Pour le test *Listening Span*, il notait les réponses directement sur la feuille de test.

Procédure

Dictée de nombres

Les nombres ont été dictés en classe pour les deux niveaux de CP et CE1 à raison de quatre dictées de 16 nombres réparties sur la semaine (une dictée par journée scolaire). Chaque enfant disposait de son matériel que l'on relevait à chaque séance afin de s'assurer qu'il n'y avait pas de modifications (corrections ou annotations) entre les séances.

Consigne :

Une explication de la tâche précédait chaque dictée de nombres pour rappeler à chaque enfant ce qu'on lui demandait exactement, c'est-à-dire d'écrire en chiffres les nombres dictés par l'expérimentateur. Pour cela, il devait écouter attentivement avant de commencer à répondre.

Comme chaque nombre devait être écrit à côté de l'image correspondante fournie dans le matériel, ceci a été indiqué à chaque fois qu'un nombre était dicté.

Exemple : *vous voyez le lion? à côté du lion écrivez : « vingt-cinq »*

La dictée n'a été commencée qu'après nous être assurés que la consigne avait été bien comprise par les enfants. Chaque nombre était répété deux fois.

Les élèves avaient été mis en confiance par l'expérimentateur qui leur avait expliqué qu'ils participaient à une petite expérience permettant de comprendre comment les enfants font pour écrire les nombres et qu'elle était sans conséquence sur leur scolarité car elle ne serait pas notée par leur enseignant. Aussi, avaient-ils été encouragés à ne pas copier sur leurs camarades, à essayer de fournir une réponse personnelle à chaque fois et à écrire une réponse même s'ils craignaient ne pas avoir donné la bonne. Comme il s'agissait d'enfants, nous avons pris le soin de rappeler à chaque nouvelle séance la même consigne de départ.

Pour éviter tout biais d'ordre, la dictée des nombres a été effectuée selon deux ordres aléatoires : une moitié de chacun des deux groupes (CP, CE1) passait le premier ordre et l'autre moitié, le second ordre.

L'expérience a eu lieu à la fin du premier trimestre (décembre). A cette période, les enfants sont en pleine phase d'apprentissage et n'ont pas encore une connaissance complète du transcodage. Une fois les réponses de chaque enfant enregistrées, nous avons procédé aux calculs nécessaires (nombre et pourcentage d'erreurs produites). Une analyse qualitative des différents types d'erreurs de transcodage a été menée par la suite.

Tests de mémoire

Une fois les dictées réalisées par l'ensemble des élèves de l'échantillon, on a procédé à la passation des tests de mémoire mais individuellement cette fois-ci. Les passations se sont déroulées environ deux mois après la passation de la dictée. Pour maintenir les enfants dans leur environnement habituel, ils étaient installés dans une salle de classe. Les passations étaient assurées en face à face pour les deux premiers tests (empan de chiffres & listening span) et côte à côte pour le dernier test (empan de mots).

Empan de chiffres

La tâche consistait à répéter une suite de chiffres que l'expérimentateur faisait entendre à l'enfant. Dans un premier test, des suites de 2 à 7 chiffres étaient lues à l'endroit. Dans un second test, indépendamment des réponses de l'enfant à la première passation, les mêmes suites étaient proposées mais l'enfant devait les restituer inversées. Par exemple, si on lisait « 8, 2 », l'enfant devait répondre « 8, 2 » dans la première passation et « 2, 8 » dans la seconde.

La consigne était la suivante : « *Je vais te dire quelques chiffres. Ecoute-les attentivement et quand j'aurai fini, tu les répéteras exactement comme moi (ou à l'envers)* ». L'échec de l'enfant à deux essais consécutifs du même item mettait fin à la passation, aussi bien pour la passation des chiffres dans l'ordre que pour la passation inversée (critère d'arrêt).

Listening span

Le listening span était administré à l'enfant dans une phase ultérieure. Il s'agissait cette fois de restituer des mots avec lesquels on complétait des phrases. Le principe consistait en une lecture par l'expérimentateur d'une série de phrases consécutives (2 à 6) dans lesquelles le dernier mot manquait. L'enfant devait trouver ces mots et les retenir pour les restituer à la fin de la série, le but étant d'évaluer la capacité de l'enfant à retenir et restituer ces mots (réponse correcte) même s'ils n'étaient pas les mots appropriés. Pour chaque longueur d'item, 3 séries de phrases ont été utilisées. Pour arrêter la passation, il fallait que l'enfant échoue à toutes les séries de phrases d'une même longueur. La réussite à une série lui permettait de passer à la série suivante de phrases.

Empan de mots

Ce subtest du K-ABC consistait à présenter à l'enfant un classeur d'images portant sur des objets différents que l'expérimentateur feuilletait avec l'enfant pour s'assurer qu'il les reconnaît. La tâche lui est expliquée par la suite ainsi : « *Je vais te dire des noms de choses dessinées. Quand j'aurais fini, je voudrais que tu touches avec ton doigt les dessins qui représentent ces choses. Montre-les exactement dans le même ordre que celui où je te les aurai dits* ». Par exemple, si l'expérimentateur disait « maison, tasse », l'enfant devait montrer la maison puis la tasse. La même tâche était répétée en ordre inverse. La tâche était constituée d'une série d'essais ; un essai pour un rappel d'un mot, deux essais pour 2, 3 et 4 mots et un essai pour 5 mots (cf.annexe 10). On arrêtait la passation lorsque l'enfant échouait à deux essais de la même longueur.

Scores

Trois scores ont ainsi pu être calculés pour chaque test de mémoire (chiffres en ordre direct, chiffres en ordre inverse, le listening span, les mots en ordre direct, mots en ordre inverse) ce qui totalisait à la fin 15 scores par enfant:

- Un premier score utilisait la longueur (globale) maximale à laquelle l'enfant avait répondu correctement. C'est-à-dire, le nombre maximum d'items correctement rappelés *e.g.*, dans le test de l'empan de chiffres, la longueur des séries des chiffres à rappeler allait de 2 à 9 chiffres dans l'ordre direct et de 2 à 8 dans l'ordre inverse. Un enfant pouvait par exemple réussir à rappeler une série de 5 chiffres maximum, son score était donc 5.

- Un deuxième score (appelé score longueur) consistait à attribuer un demi-point par essai correct (dans une série de même longueur) dans les tests d'empan de chiffres et de mots et un tiers de point par essai réussi pour le listening span. On ajoutait un point pour la longueur "un item" non testée (dans les tests empan de chiffres et le listening span).
- Le troisième et dernier score ou score mots, consistait en l'attribution d'un point par mot correctement rappelé dans chaque essai réussi.

A la fin, nous avons choisi un de ces scores pour l'analyse ultérieure (*cf. infra* pour l'explication).

Résultats

Le transcodage des 64 nombres a conduit à 1224 erreurs (58%) au total en CP, 372 erreurs (15%) en CE1 (Tableau 4.1) et à un taux de 1,5 % de non réponses au CP et à 0,3% au CE1

Tableau 4.1 : Pourcentage d'erreurs et de non-réponses pour les enfants de CP et de CE1

	CP N = 33	CE1 N = 39
% d'erreurs (écart-type)	58 (17)	15 (15)
% Non-réponses	1.5	0.3

Aucun effet significatif d'ordre des nombres dictés n'a été observé chez les deux groupes d'âge étudiés. Les enfants de CP produisaient significativement plus d'erreurs sur les 64 nombres dictés que les enfants de CE1 $F_1(1,70) = 108.6, p < .0001, F_2(1,63) = 208.81, p < .0001$.

Les enfants de **CP** ont produit 4 erreurs sur les nombres à un chiffre (2%, SD = 2.53), 649 erreurs sur les nombres à deux chiffres (53%, SD = 31.43), 549 erreurs sur les nombres à trois chiffres (89%, SD = 6.06) et 43 erreurs sur les nombres « cent » et « mille » (33%, SD = 4.55) qui ont été dictés chacun deux fois.

Par ailleurs, une évolution importante des taux d'erreurs a été observée chez les enfants de **CE1**. Ces enfants n'ont produit aucune erreur sur les nombres à un chiffre. Ils ont produit 90

erreurs (6%, SD = 7.22) sur les nombres à 2 chiffres, 276 erreurs (39%, SD = 11.9) sur les nombres à 3 chiffres et 6 erreurs (4%, SD = 3.31) sur les nombres séparateurs « cent » et « mille ». Cette diminution de taux d'erreurs avec l'âge indique un développement de l'acquisition du système de transcodage qui s'installe graduellement avec l'apprentissage. La figure 4.1 illustre la répartition de ces erreurs sur les différentes catégories lexicales chez les deux groupes d'âge (CP & CE1) :

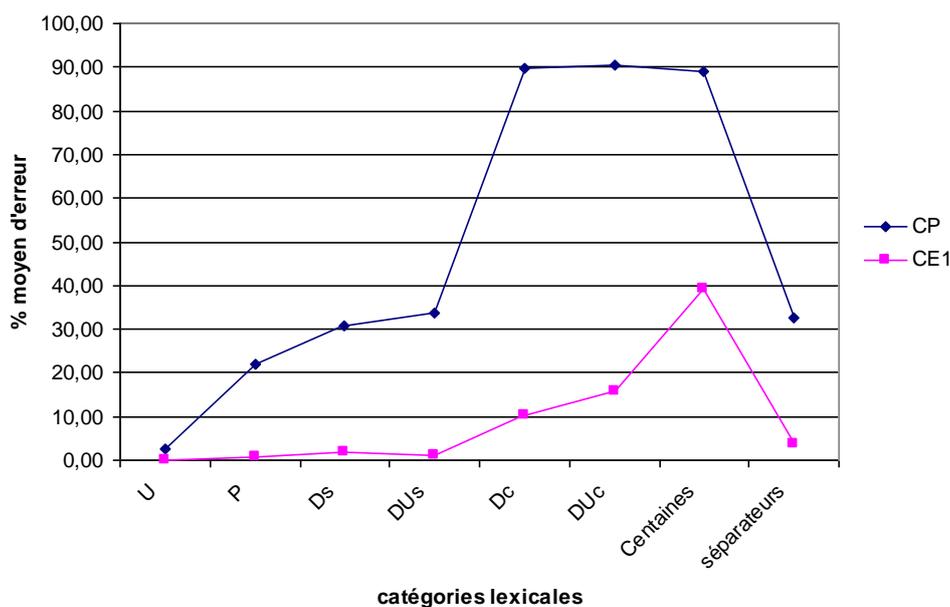


Figure 4.1 : Pourcentage moyen d'erreurs en fonction de différentes catégories lexicales et de l'âge (CP & CE1)

Comme on peut le constater pour les enfants de CE1, les nombres de deux chiffres dont la structure lexicale est simple ne posaient plus de difficultés lors de leur transcodage (moins 2% d'erreurs). Par contre, le transcodage de ces nombres semblait peu maîtrisé par les enfants de CP (22% à 34% d'erreurs). Par ailleurs, le transcodage des nombres de deux chiffres qui ont une structure lexicale complexe (les dizaines-complexes « Dc » et les dizaines-unités complexes « DUC ») posaient plus de difficultés par rapport à ceux qui ont une structure simple pour les deux groupes d'âge. Toutefois, cette difficulté est moins importante chez les enfants de CE1 (respectivement 10% et 16% d'erreurs) que chez les enfants de CP qui produisaient le maximum d'erreurs (90% dans chaque catégorie). Le transcodage des nombres « centaines » était mieux maîtrisé par les enfants de CE1 (39% d'erreurs) mais il restait plus difficile que les autres nombres dictés. Le transcodage des nombres « séparateurs » ne donnait

pas lieu à une difficulté spécifique par rapport aux nombres à deux chiffres dont la structure lexicale est simple et ceci est vrai pour les deux groupes d'âge.

Les règles du modèle ADAPT et les erreurs de transcodage

Les résultats ci-dessus montrent que les enfants de CE1, contrairement aux enfants de CP, ont produit peu d'erreurs sur les nombres de deux chiffres. Ceci pourrait indiquer qu'ils maîtrisaient mieux les règles de transcodage de ces nombres ce qui rendait leur écriture moins coûteuse que pour enfants de CP qui sont encore en phase d'apprentissage de ces règles.

Nous avons évalué la performance de transcodage chez les deux groupes d'âge (CP et CE1) sur les nombres dictés en fonction des règles de transcodage nécessaires selon ADAPT.

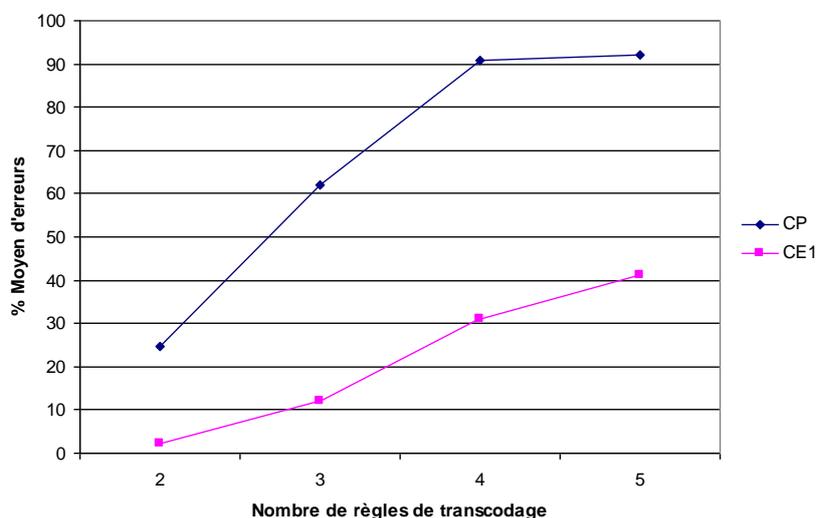


Figure 4.2 : Pourcentage moyen d'erreurs en fonction du niveau de classe (CP & CE1) et du nombre de règles de transcodage à appliquer (de 2 à 5 règles)

Globalement pour les deux groupes d'âge, une augmentation du pourcentage d'erreurs a été observée en fonction du nombre de règles : plus le transcodage du nombre exigeait de règles plus le pourcentage d'erreurs était élevé $F_1(3, 210) = 144.64, p < .0001, F_2(3, 60) = 34.77, p < .0001$ (Figure 4.2). Cette augmentation était plus forte chez les enfants de CP que chez les enfants de CE1, $F_1(1, 70) = 90.30, p < .0001, F_2(1, 60) = 253.67, p < .0001$.

On relève (figure 4.2) que les pourcentages d'erreurs augmentaient significativement avec le nombre de règles (2, 3, 4 et 5 règles) en CP, $F(3, 96) = 136.45, p < .0001$ et en CE1, $F(3, 114) = 36.38, p < .0001$. Les résultats du groupe CP présentent une tendance linéaire forte sur le transcodage des nombres nécessitant 2, 3 et 4 règles $F(1, 32) = 203.23, p < .0001$, de même que les résultats du groupe CE1 sur les nombres requérant 2, 3, 4 et 5 règles $F(1, 38) = 41.07,$

$p < .0001$. On note que la performance des enfants de CP chute dramatiquement lorsqu'on passe des nombres nécessitant 2 règles (25%) pour leur transcodage aux nombres qui en nécessitent 3 (62%) puis aux nombres qui en nécessitent 4 (91%). Cette performance est significativement différente de celle des enfants de CE1, $F_1(1, 70) = 71.62$, $p < .0001$ (de 2 à 3 règles), $F_1(1, 70) = 3.82$, $p = .05$ (de 3 à 4 règles). Enfin, les résultats montrent un effet plafond pour les enfants de CP lorsqu'on propose des nombres nécessitant 5 règles pour leur transcodage alors que la performance des enfants de CE1 régresse légèrement par rapport aux nombres qui en nécessitent 4, $F_1(1, 70) = 5.49$, $p < .05$.

L'interaction (âge x nombre de règles) était significative $F_1(3, 210) = 15.84$, $p < .0001$, $F_2(3, 60) = 12.85$, $p < .0001$. Plus les enfants sont jeunes (CP = 6 ans 5 mois vs CE1 = 7 ans 5 mois), plus le nombre d'erreurs dans le transcodage augmente lorsque le nombre de règles augmente.

La capacité de mémoire de travail:

Pour évaluer l'impact de la mémoire de travail sur la performance de transcodage, nous avons calculé les corrélations entre les scores de mémoire de chaque enfant des deux niveaux scolaires (CP & CE1) et leur pourcentage d'erreurs de transcodage. Comme nous l'avons expliqué précédemment, nous avons calculé trois scores pour chaque enfant sur chaque test de mémoire. Le premier score était le score appelé « score longueur globale maximale » (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 : Scores « longueur globale maximale » en fonction du niveau scolaire (CP et CE1): le score maxi indique le score le plus élevé dans le groupe, le score mini indique le score le plus faible dans le groupe

		ordre direct	ordre inverse		ordre direct	ordre inverse
		Memoire chiffres	Memoire chiffres	Listening span	Memoire mots	Memoire mots
Score max	CP	6	4	3	5	4
Score mini		3	2	1	2	1
Moyen		4,48	2,82	2,12	3,79	2,85
(Ecart-type)		(0.87)	(0.64)	(0.65)	(0.7)	(0.71)
Score max	CE1	7	6	5	5	5
Score mini		3	2	1	3	2
Moyen		4,95	3,08	2,49	4,21	3,21
(Ecart-type)		(0.89)	(1.04)	(0.88)	(0.61)	(0.73)

Comme on peut le constater globalement, une légère différence existe entre les enfants des deux niveaux scolaires pour ces scores ; les enfants de CE1 ont des scores plus élevés sur tous les tests.

Le deuxième score calculé était ce qu'on a appelé « score longueur » qui consistait à attribuer un demi-point par essai correct (dans une série de même longueur) dans les tests d'empan de chiffres et de mots et un tiers de point par essai réussi pour le listening span. Un point a été ajouté pour la longueur « un item » non testée (dans les tests d'empan de chiffres et le listening span). La figure 4.2 suivante illustre les scores moyens de chaque niveau scolaire sur les tests des mémoires :

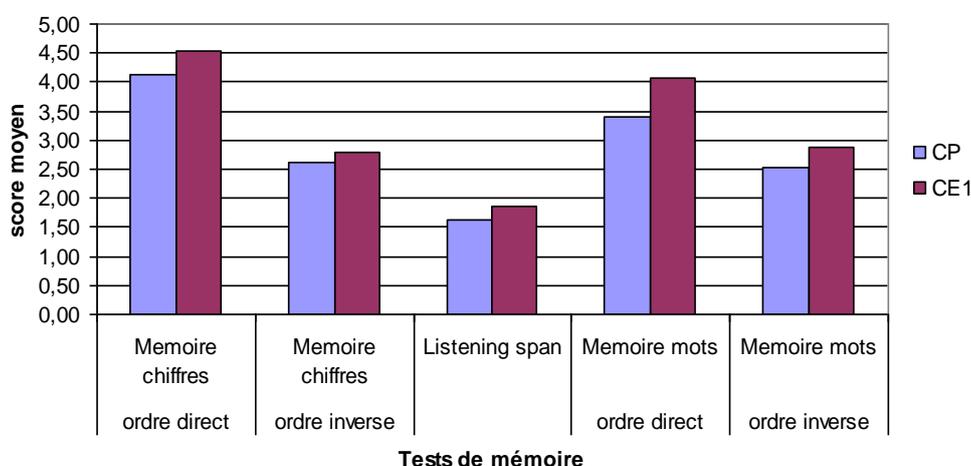


Figure 4.3 : « Score longueur » moyen en fonction du niveau scolaire et des tests de mémoire

Comme le montre la figure 4.3, les scores des enfants de CE1 sont globalement supérieurs à ceux des enfants de CP mais cette différence reste quand même faible.

Le troisième score calculé était le « score mots » qui consistait en l'attribution d'un point par mot correctement rappelé dans chaque essai réussi. Ainsi, le score mot d'un enfant correspondait à la somme des points sur tous les essais réussis d'un test de mémoire. La figure 4.4 montre la différence de moyennes des scores mot des enfants sur chaque test de mémoire en fonction de leur niveau scolaire (CP, CE1).

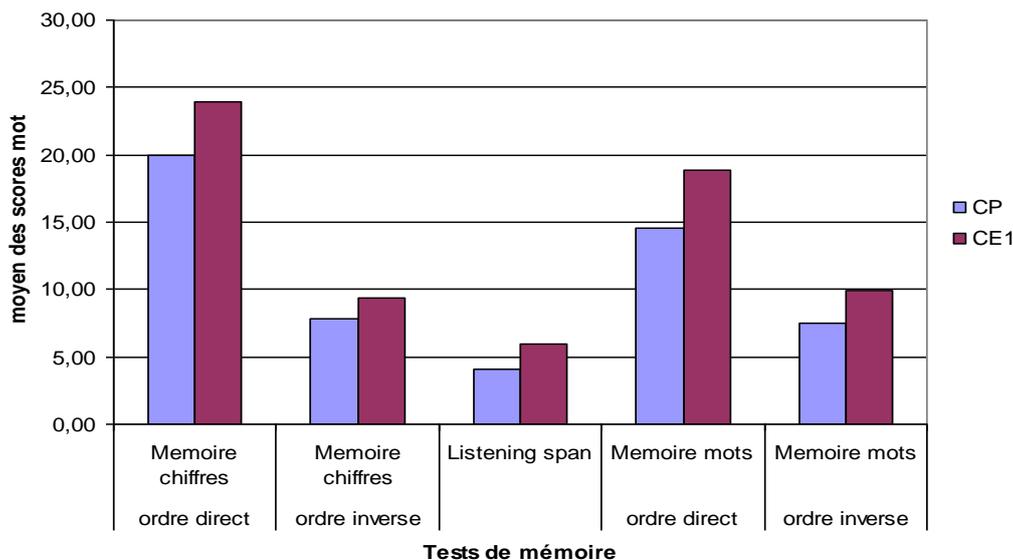


Figure 4.4 : Résultats moyens des scores mots obtenus dans les différents tests de mémoire en fonction du niveau scolaire (CP & CE1)

L'analyse de la figure 4.4 montre que les enfants de CE1 ont globalement des meilleurs scores de mémoire sur tous les tests, $F(1, 70) = 9.97, p < .01$. Les scores sur les différents tests de mémoire diffèrent aussi significativement $F(4, 280) = 200.24, p < .0001$. Par contre l'interaction âge x scores n'était pas significative ($p = .18$). Sur les tests « mémoire de chiffres en ordre direct », « Listening span », « mémoire de mots en ordre direct », « mémoire de mots en ordre inverse », les enfants de CE1 avaient des meilleurs scores de mémoire, respectivement $F(1, 70) = 4.89, p < .05$, $F(1, 70) = 5.08, p < .05$, $F(1, 70) = 13.43, p < .001$, $F(1, 70) = 5.33, p < .05$. Par contre, cette différence n'était pas significative pour le test « mémoire de chiffres en ordre inverse » ($p = .20$).

Corrélations entre différents scores de mémoire sur les différents tests :

Pour l'analyse ultérieure nous considérerons seulement **le score mots**. Ce score apparaissait le plus pertinent dans les premières analyses qui ont été faites. Il nous paraît le plus sensible pour montrer la différence de mémoire de travail entre les enfants de CP et de CE1 (figure 4.4). Cette sensibilité liée au mot viendrait du traitement des mots-nombres employés pour les écrire en chiffres puisque le transcodage étudié concerne le passage de la forme verbale vers la forme en chiffres.

Ces scores de mémoire ont été transformés en « note z » (loi normale centrée réduite (1 ; 0)). Le tableau 4.3 résume les corrélations entre ces différents scores obtenus aux différents tests de mémoire et ceci pour les deux groupes d'âge :

Tableau 4.3 : Corrélations entre les scores mots obtenus aux différents tests de mémoire chez les CP et chez les CE1

CP	Mémoire chiffres		Listening span	Mémoire mots	
	Ordre direct	Ordre inverse		Ordre direct	Ordre inverse
Mémoire chiffres Ordre direct	1	-0,09	0,14	0,51 **	0,04
Mémoire chiffres Ordre inverse		1	0,18	0,09	0,28
Listening span			1	0,53 ***	0,43 **
Mémoire mots Ordre direct				1	0,49 **
Mémoire mots Ordre inverse					1
CE1	Mémoire chiffres		Listening span	Mémoire mots	
	Ordre direct	Ordre inverse		Ordre direct	Ordre inverse
Mémoire chiffres Ordre direct	1	0,53 ****	0,55 ****	0,62 ****	0,62 ****
Mémoire chiffres Ordre inverse		1	0,46 **	0,49 ***	0,51 ****
Listening span			1	0,42 **	0,39 **
Mémoire mots Ordre direct				1	0,48 **
Mémoire mots Ordre inverse					1

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001, **** p < .0001

Les différents scores de mémoire étaient globalement corrélés entre eux notamment chez les enfants de CE1. Ceci pourrait être dû au fait qu'il y a plus de variabilité interindividuelle en CP (cette variabilité diminuant au fur et à mesure du développement) mais aussi à un effet d'échantillonnage.

Pour vérifier quel test de mémoire prédit le mieux le pourcentage d'erreurs de transcodage, nous avons procédé à une analyse de régression multiple pas à pas chez les deux groupes d'âge. Pour ce faire, nous avons pris les scores de mémoire « non-composites » comme variables indépendantes et le pourcentage d'erreurs comme variable dépendante. Cette analyse a montré que, chez les enfants de **CP**, la mémoire de mots en ordre inverse était le meilleur prédicteur d'erreurs, $r = .51$, $p < .01$. Cette variable expliquait 26 % de la variance observée ($R^2 = .257$). La seconde variable expliquant significativement la variance était la mémoire de chiffres en ordre direct (R^2 change = .16). Prises conjointement la mémoire de mots en ordre inverse et la mémoire de chiffres en ordre direct expliquaient 42% de la variance observée. Aucune autre variable n'avait d'effet significatif.

Chez les enfants de **CE1**, l'analyse a montré que le meilleur prédicteur d'erreurs était la mémoire de mots en ordre inverse, $r = .45$, $p < .05$. Cette variable était la seule qui expliquait significativement 20% de la variance observée ($R^2 = .199$).

Effet de la capacité de la mémoire de travail sur le transcodage

Dans le but d'affiner cette analyse, nous avons défini deux groupes d'enfants en fonction de leur capacité de mémoire (Low working memory span = L et High working memory span = H) indépendamment de leur niveau scolaire à partir de l'ensemble des enfants de CP et de CE1 (72 sujets). Ceci a été fait en considérant les scores « z » sur le test « mémoire de mots en ordre inverse ». Nous avons choisi ce test car il était le plus corrélé avec les autres tests de mémoire (Tab 4.3) et en plus il nous paraissait le plus sensible par rapport à notre problématique (le transcodage de la forme verbale vers la forme en chiffre). Ainsi, les enfants qui ont obtenu un score « z » supérieur à + 0.67 ont été classés dans le groupe « H » et ceux qui ont obtenu un score « z » inférieur à - 0.67 ont été classés dans le groupe « L ». Ces procédures ont permis à la sélection de 17 enfants avec des scores de mémoire faibles (L) et 20 avec des scores élevés (H). Une corrélation négative a été observée entre les scores de mémoire des deux groupes et leurs pourcentages d'erreurs $r = - .47$, $p < .01$. Une analyse

ANOVA à mesures répétées a porté sur le pourcentage d'erreurs produites par les enfants sur les nombres s'écrivant, selon ADAPT, à l'aide de 2, 3, 4 et 5 règles en fonction de leur capacité de mémoire: « L », et « H ». Cette analyse a montré que le pourcentage d'erreurs produites par les enfants « L » était significativement plus élevé ($M = 50\%$, $SD = 25.8$) que celui des enfants « H » ($M = 25\%$, $SD = 27.6$), $F(1, 35) = 8.23$, $p < .01$ (Figure 4.5). Le pourcentage d'erreurs augmentait significativement avec le nombre de règles nécessaires pour transcoder les nombres ; il passait de 14.5 % pour les nombres à 2 règles à 63.1 % pour les nombres à 5 règles, $F(3, 105) = 57.51$, $p < .0001$. En outre, comme prédit, l'interaction entre le nombre de règles et la capacité de la mémoire de travail était significative $F(3, 105) = 4.46$, $p < .01$. La différence de pourcentage d'erreurs entre les deux groupes n'était significative qu'entre 2 et 3 règles $F(1, 35) = 5.35$, $p < .05$ et tendancielle entre 3 et 4 règles $p = .07$.

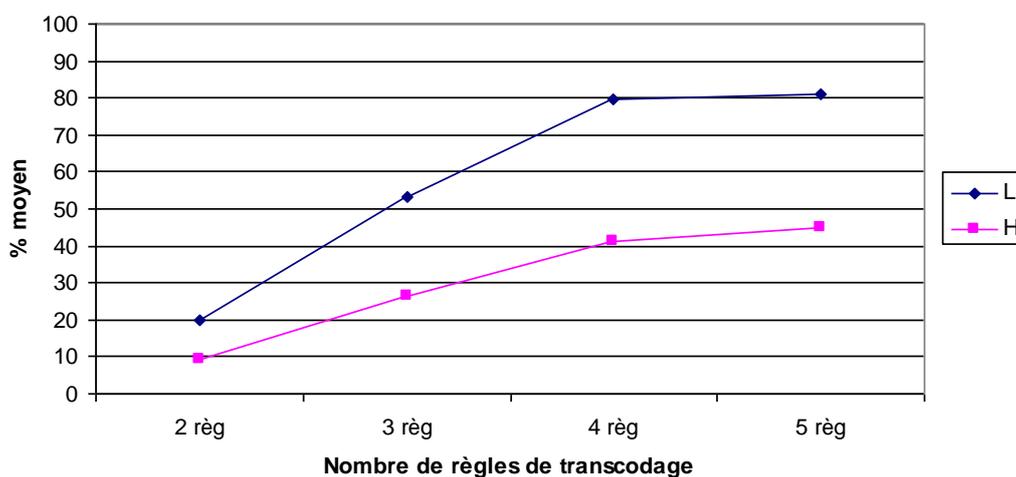


Figure 4.5 : Pourcentage moyen d'erreurs en fonction du nombre de règles (2 à 5) et la capacité de mémoire (Low memory & High memory span)

En prenant indépendamment les deux groupes Low Memory Span (L) et High Memory Span (H), l'analyse a montré que plus un nombre nécessitait de règles pour son transcoding, plus le pourcentage d'erreurs était élevé chez les enfants qui ont une faible capacité de mémoire $F(3, 48) = 55.46$, $p < .0001$, comme pour les enfants qui ont une capacité élevée $F(3, 57) = 13.92$, $p < .0001$. Une tendance linéaire a été observée chez les deux groupes, $F(1, 16) = 67.02$, $p < .0001$, $F(1, 19) = 16.49$, $p < .001$, respectivement pour les enfants L et les enfants H.

Effet de la MdT sur le transcodage des nombres selon les catégories lexicales :

Par ailleurs, puisque les règles de transcodage sont liées à la catégorie lexicale des nombres, nous avons cherché à vérifier la différence de performance de transcodage des deux groupes de mémoire sur ces différentes catégories (Figure 4.6)

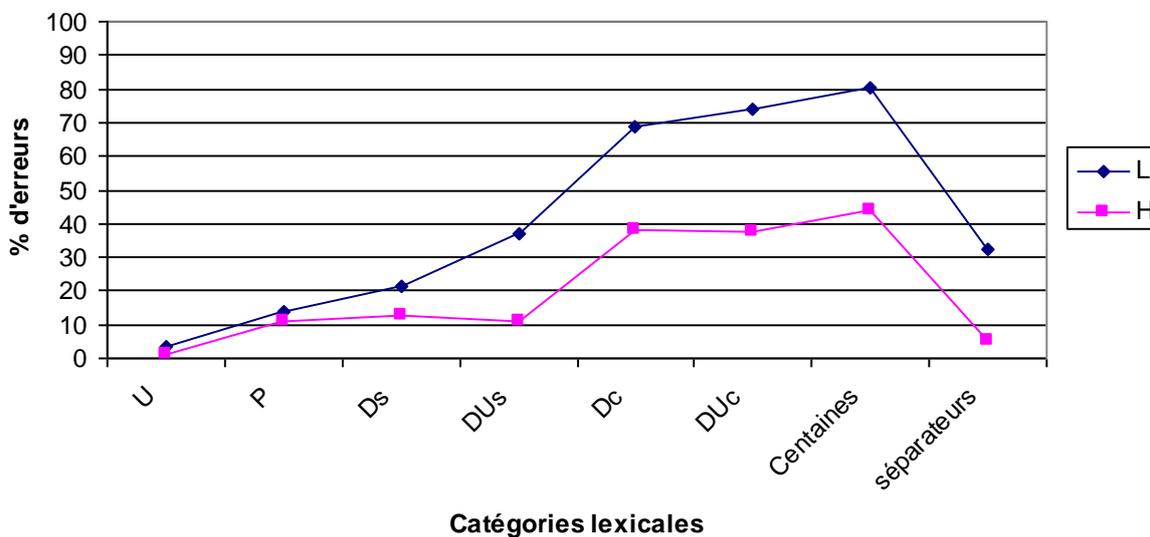


Figure 4.6: Pourcentage d'erreurs de transcodage en fonction des différentes catégories lexicales et de la capacité de mémoire (L : Low working memory span, H : High working memory span)

Comme nous pouvons le constater, globalement la différence de performance entre les deux groupes (L & H) indépendamment de l'âge augmente à partir de la catégorie dizaines-unités simples «DUs». On observe également que les enfants «L» ont plus de difficulté à transcoder les nombres DUs que les nombres Ds alors que ceux qui ont une meilleure capacité de mémoire de travail (H) n'ont pas cette difficulté ni cette différence de performance sur les DUs et les Ds. Ceci montre que dès que ces enfants (H) disposaient des règles nécessaires pour transcoder les nombres Ds ils pouvaient transcoder les nombres DUs. On note également cette différence entre les deux groupes d'enfants sur les formes Dc et DUc.

Toutefois, puisqu'un groupe de mémoire inclut des enfants des deux niveaux scolaires concernés et donc un effet potentiel d'apprentissage, nous avons cherché à vérifier plus précisément la performance en prenant séparément les deux niveaux scolaires et les deux niveaux de capacité de mémoire de travail (Figure 4.7). Ceci nous a amené à définir 4

groupes : les enfants de CP « L » (9 sujets) et « H » (10 sujets), les enfants de CE1 « L » (8 sujets) et « H » (10 sujets).

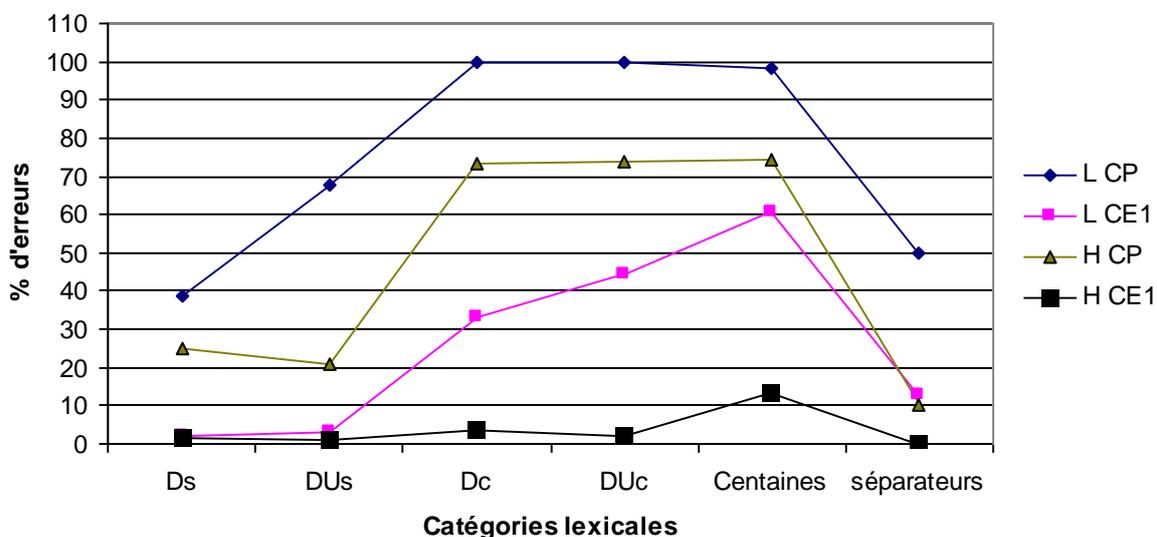


Figure 4.7: Pourcentage d'erreurs de transcodage en fonction des différentes catégories lexicales, du niveau scolaire (CP, CE1) et de la capacité de mémoire (L : Low working memory span, H : High working memory span)

Comme le montre la figure 4.7, un effet d'apprentissage se traduit par une performance meilleure de transcodage chez les enfants de CE1 par rapport aux enfants de CP quelle que ce soit leur capacité de mémoire. Par ailleurs, la différence de capacité de la mémoire de travail a une influence sur la performance de transcodage des enfants qui ont le même niveau scolaire. Cette influence paraît importante surtout chez les enfants de CE1. Ces derniers devraient, *a priori*, avoir déjà appris les règles de transcodage pour les nombres jusqu'à « cent » au niveau scolaire précédent. Toutefois, on observe chez ces enfants une différence de performance de transcodage sur les catégories Dc, DUc entre les groupes L et H. Le transcodage des nombres appartenant aux catégories Ds, DUs, Dc, DUc ne posait pas de difficultés aux enfants de CE1 dont la capacité de la mémoire de travail est élevée « H » (entre 1 et 3% des erreurs) alors que les enfants de faible capacité de mémoire (L) montraient plus de difficultés sur les catégories Dc (33% des erreurs) et DUc (44%). De plus, le transcodage des nombres centaines apparaissait plus difficile pour les enfants de CE1 du groupe L (60 % d'erreurs) que pour les élèves du groupe H (13 % d'erreurs). Le transcodage des nombres séparateurs était maîtrisé par le groupe H (0% d'erreurs) et moins maîtrisé par le groupe L (13% d'erreurs).

Quant aux enfants de **CP**, une différence de performance, entre les groupes L et H est notable surtout sur la catégorie DUs. Chez les plus faibles (L), le transcodage des nombres appartenant à cette catégorie était plus difficile (68 %) que pour les nombres Ds (39 %). Par contre, chez les enfants catégorisés H, le transcodage des nombres DUs fournissait moins d'erreurs (21%) et différait peu avec les Ds (25 % d'erreurs). Le transcodage des nombres Dc et DUc (100% d'erreurs) et des centaines (98% d'erreurs) était impossible pour le groupe L alors que les enfants du groupe H les transcodaient, mais avec beaucoup de difficultés (74% d'erreurs). Une différence importante était également relevée sur les nombres séparateurs « 100 » et « 1000 ». Le transcodage de ces nombres s'avérait plus difficile chez les enfants catégorisés L (50% d'erreurs) que chez ceux du groupe H (10% d'erreurs) et ce toujours dans le même niveau scolaire (CP).

En résumé, chez les enfants de CP, une influence notable de la capacité de mémoire se révélait sur la catégorie DUs. Les enfants de groupe « H » semblaient avoir acquis les règles de transcodage des nombres DUs et les appliquaient mieux que ceux du groupe « L ». Par ailleurs, la performance supérieure des enfants de groupe « H » sur les nombres Dc et DUc nous permet de penser que ces enfants parvenaient à employer leurs connaissances des structures simples (Ds et DUs) pour transcoder les nombres complexes (Dc et DUc). Leur empan élevé en mémoire de travail leur permettait de stocker la totalité de la chaîne numérique verbale pour la traiter ensuite. Une influence importante de la capacité de la MdT était également notable sur les nombres séparateurs « 100 » et « 1000 ». Le transcodage de ces nombres s'avérait plus difficile chez les enfants de groupe « L » (50% d'erreurs) que chez ceux de groupe « H » (10% d'erreurs).

Cette influence de MdT paraît importante chez les enfants de **CE1** et se révélait notamment dans la performance du groupe L sur les nombres complexes (Dc et DUc) et les nombres centaines. Les enfants de CE1 qui ont une faible capacité de mémoire montraient une difficulté importante de transcodage sur les nombres Dc, DUc qui devaient avoir été appris au niveau scolaire précédent. Ces nombres donnaient encore lieu à un transcodage algorithmique et semblaient être donc cognitivement coûteux pour les enfants de groupe « L ». Le transcodage des nombres « centaines » a révélé aussi un coût cognitif élevé de traitement.

Analyse qualitative et mémoire de travail :

Pour compléter cette analyse quantitative et pour voir donc en quoi consistaient les erreurs des enfants, nous avons procédé à une analyse qualitative des erreurs produites par ces quatre groupes sur les catégories Ds, DUs, Dc, DUc, centaines et les séparateurs. Nous considérons les types d’erreurs produits deux fois sur la même catégorie. Ainsi nous avons pu classer pour l’ensemble de groupes 93% des erreurs (789/849) Tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Pourcentage d’erreurs classées pour chaque groupe selon le niveau scolaire (CP & CE1) et la capacité de MDT (L & H) sur les catégories Ds, DUs,Dc, DUc, centaines et les séparateurs

	L				H			
	CP		CE1		CP		CE1	
	total err	classées						
Nombre d'erreurs	397	359	142	137	281	267	29	24
%	81,7	90,4	32,9	96,5	52,0	95,0	5,4	82,8

Leurs erreurs ont été classées selon leur nature lexicale ou syntaxique pour être subdivisées ensuite en plusieurs groupes. Les erreurs qui ne correspondent à aucune de ces catégories ont été classées comme « inclassables ».

Erreurs commises en CP:

Les erreurs classées de l’ensemble des groupes sont principalement de nature syntaxique. Nous avons montré précédemment (*cf.* figure 4.7) que les enfants de **CP** classés « L » ont fait plus d’erreurs sur les **DUs** (68%) que les enfants classés « H » (21%). Leurs erreurs (groupe « L ») sur les DUs étaient essentiellement de nature syntaxique et correspondaient en majorité au transcodage littéral partiel comme écrire « 10 » pour « dix-neuf » ou « 3 » pour « vingt-trois ». Concernant les **Dc** et les **DUc**, qui étaient extrêmement difficiles à transcoder pour ces enfants, les erreurs étaient aussi en grande majorité syntaxiques et du type transcodage littéral partiel (*e.g.*, écrire « 601 » pour « soixante-dix » et « 411 » pour « quatre-vingt onze »). Quant aux nombres **séparateurs** « cent » et « mille » les enfants ont produit des erreurs qui correspondaient à la suppression d’un zéro en transcodant ces nombres (*e.g.*, écrire « 10 » pour « cent » et « 100 » pour « mille », outre qu’ils ont produit de nombreuses erreurs inclassables. Concernant les **centaines**, les types d’erreurs produites par les enfants de faible empan en mémoire étaient variés. Le type d’erreur le plus fréquent chez ces enfants était le transcodage littéral partiel (*e.g.*, écrire « 1002 » pour « cent vingt deux » ou « 3100 » pour

« trois cent trois »). Par ailleurs, une partie importante des erreurs produites sur cette catégorie était le transcodage littéral complet. D'autres types d'erreurs peu fréquents correspondant à l'ajout de 2 et 3 zéros (après le « 1 » du cent) ou à la suppression d'un zéro (intercalaire) ont été également observés. Sur les nombres **DUs** les erreurs des enfants du groupe « **H** » étaient essentiellement de nature syntaxique et correspondaient en majorité au transcodage littéral complet comme écrire « 502 » pour « cinquante-deux ». Concernant les **Dc** et les **DUc** les erreurs étaient en grande majorité syntaxiques et du type transcodage littéral partiel. Une erreur également fréquente sur ces catégories correspondait au transcodage littéral complet (e.g., écrire « 42010 » pour « quatre-vingt dix » et « 6017 » pour « soixante dix-sept »). Quant aux nombres **séparateurs** « cent » et « mille » ces enfants ont plutôt réussi à les transcoder. Concernant les **centaines**, le type d'erreur le plus fréquent chez ces enfants était le transcodage littéral complet (comme écrire « 410020 » pour « quatre cent vingt »). Le transcodage littéral partiel a été observé mais moins fréquemment. On a observé peu fréquemment aussi l'erreur correspondant à l'ajout d'un zéro.

Pour résumer, nous avons remarqué que sur les DUs, à la différence des enfants de faible capacité en mémoire de travail, les erreurs de transcodage littéral partiel étaient moins nombreuses chez les enfants qui ont une capacité élevée et le type d'erreur le plus fréquent était le transcodage littéral complet. Concernant les **Dc** et **DUc**, les types d'erreurs ne différaient pas entre les deux groupes de mémoire « L » et « H » et correspondaient essentiellement au transcodage littéral partiel. Le transcodage littéral complet apparaît cependant plus fréquemment chez les enfants du groupe « H » que chez ceux du groupe « L ». Quant aux nombres **séparateurs** « cent » et « mille », les enfants classés « L » avaient tendance à supprimer des zéros, une difficulté qui n'a pas été observée dans l'autre groupe. Concernant les **centaines**, le type d'erreur le plus fréquent chez les enfants « empan faible » était le transcodage littéral partiel alors que le transcodage littéral complet était plus fréquent chez les enfants à empan élevé pour qui le transcodage littéral partiel a toutefois été observé, mais moins fréquemment. L'erreur correspondant à l'ajout d'un zéro était peu produite par ce groupe « H ».

Les enfants du groupe « L » produisaient fréquemment des erreurs de types transcodage littéral partiel sur les DUs, les Dc, DUc et les nombres centaines. La suppression de zéros était le seul type d'erreur observé sur les nombres séparateurs.

Les enfants du groupe « H » produisaient fréquemment des erreurs de types transcodage littéral complet sur les DUs et les centaines alors que sur les Dc et les DUC le transcodage littéral partiel étaient plus fréquents.

Erreurs produites par les CE1 :

Concernant les enfants de **CE1**, nous avons remarqué précédemment (cf. Figure 4.7) une difficulté de transcodage chez les enfants « empan faible » sur les Dc, les DUC et les nombres centaines. Leurs erreurs sur les nombres complexes **Dc** et **DUC** étaient en majorité de nature syntaxiques, dont l'erreur la plus fréquente était le transcodage littéral partiel (e.g., écrire « 42 » pour « quatre vingt » et « 4213 » pour « quatre vingt treize »). Une autre erreur syntaxique fréquente était le transcodage littéral complet. En outre, des erreurs classées comme lexicales étaient fréquemment observées sur les Dc et DUC (e.g., écrire « 71 » pour « 70 », « 67 » pour « 77 » ou « 41 » pour « quatre-vingt onze » malgré certains doutes sur le fait que ce type d'erreur peut être aussi un transcodage littéral partiel (voir Barrouillet *et al.*, 2004, p379). Concernant les nombres **centaines**, contrairement aux enfants du groupe « H », le transcodage de ces nombres posait des difficultés importantes (60% d'erreurs) aux enfants du groupe « L » (Figure 4.7). Leurs erreurs en transcodant ces nombres étaient en grande majorité syntaxiques. L'erreur la plus fréquente était le transcodage littéral complet (écrire « 710015 » pour « sept cent quinze »). Le reste des erreurs syntaxiques se répartissaient entre l'ajout d'un zéro (e.g., écrire « 6013 » pour « six cent treize ») et le transcodage littéral partiel (e.g., écrire « 12 » pour « cent douze »). Alors que chez les enfants du groupe « H », le seul type d'erreur syntaxique observé était l'ajout d'un zéro (écrire « 4020 » pour « quatre cent vingt »). Ce zéro intercalaire était toujours ajouté après le chiffre des « centaines ». Sur les nombres **séparateurs** « cent » et « mille », les enfants de groupe « L » produisaient quelques erreurs seulement sur le nombre « mille » alors que le nombre « cent » était maîtrisé. Ces erreurs produites sur le nombre « mille » correspondaient à l'ajout d'un zéro donc à écrire « 10000 ».

Pour résumer, les enfants du groupe « L » étaient en retard pour l'apprentissage des règles de transcodage des nombres complexes Dc et DUC qui auraient dû normalement être maîtrisés au niveau scolaire précédent. Leurs erreurs sur ces nombres correspondaient essentiellement à une transcription littérale partielle de la chaîne numérique verbale alors que leurs erreurs sur les nombres **centaines** correspondaient essentiellement à un transcodage littéral complet. Le seul type d'erreur syntaxique observé dans le groupe « H » sur ces nombres centaines était

l'ajout d'un zéro. Ce type d'erreur montre une meilleure capacité à gérer la longueur de la chaîne en chiffres que le type d'erreur précédent (transcodage littéral complet).

Discussion

Dans la littérature, plusieurs études ont observé une différence de performance liée à la capacité de la MdT des sujets en effectuant des tâches cognitives (Daneman & Carpenter, 1980; Jarrold & Towse, 2006) et surtout celles qui impliquent des activités arithmétiques mentales complexes (Case, Kurland, and Goldberg, 1982; DeStefano & LeFevre, 2004; McLean & Hitch, 1999). Cette différence a été observée même sur des tâches qui impliquent des activités mathématiques élémentaires (comme la résolution des opérations simples) qui ne demandent qu'une récupération directe de la réponse en MLT. Dans une étude sur les stratégies adoptées par les enfants pour calculer, Noël, Seron et Travarelly (2004) ont évalué les capacités de la boucle phonologique et de l'administrateur central d'enfants de 1^{ère} année d'école primaire (CP) en début de l'année scolaire et quatre mois plus tard sur la réussite opératoire. Ils ont montré que ces capacités sont de bons prédicteurs des performances en addition. Une bonne capacité de la boucle phonologique est liée à une utilisation plus fréquente des stratégies matures comme la récupération de faits en MLT et plus rare d'algorithmes immatures de comptage (du tout ou sur les doigts). Pour Geary (1990, 1993, 1994) ces stratégies immatures (comme le comptage sur les doigts), seraient utilisées pour pallier les faibles capacités de mémoire de travail et *vice-versa* des faibles capacités de mémoire de travail pourraient rendre compte de la difficulté à mémoriser des faits arithmétiques. (*cf* aussi Adams et Hitch, 1998; Barrouillet & Lépine, 2005 ; McKenzie, Bull et Gray, 2003). L'influence des différences individuelles en capacité de MdT dans des activités plus simples comme le transcodage des nombres n'était pas suffisamment étudiée, surtout chez les enfants en début d'apprentissage.

ADAPT décrit le transcodage des nombres comme un processus à multiples étapes qui comporte l'application de règles. Dans l'étude développementale d'ADAPT (Barrouillet *et al*, 2004) portant sur des enfants scolarisés en CE1 et CE2 de l'école primaire, une corrélation significative a été trouvée entre le nombre de règles (ADAPT_{LD}) et le nombre d'erreurs produites par les enfants. De même, dans notre présente étude, le nombre de règles (ADAPT_{BASIC}) nécessaires pour transcoder un nombre a prédit aussi le taux d'erreurs et ceci

chez les deux niveaux scolaires étudiés (CP, CE1). Toutefois, cet effet du nombre de règles était plus important chez les enfants de CP que chez les enfants de CE1 qui n'ont pas seulement un niveau d'apprentissage plus élevé mais aussi une meilleure capacité de MdT. Nous avons vu que les enfants de CP ont produit un pourcentage important d'erreurs sur les nombres à deux chiffres alors que peu d'erreurs y ont été produites par les enfants de CE1. Ceci indique que ces derniers avaient stocké en mémoire à long terme les formes en chiffres correspondant et que le transcodage de ces nombres a nécessité la récupération directe en MLT de ces formes au lieu de passer par le transcodage algorithmique en appliquant plusieurs règles. Ainsi comme le prédit ADAPT l'accroissement du lexique a augmenté l'efficacité du transcodage puisque la récupération directe des formes en chiffres arabes est plus rapide que la mise en œuvre d'un algorithme de transcodage impliquant de nombreuses règles.

Les résultats de notre étude rejoignent les observations récentes de Camos (2008) et de Zuber *et al.*, (2009) qui ont montré un impact de la capacité de la MdT sur le transcodage des nombres chez des enfants français et allemands en école primaire (âge moyen de 7 ans et 11 mois, 7 ans et 4 mois respectivement). Comme le prédit ADAPT, nous avons observé que les enfants qui ont une faible capacité de MdT ont produit plus d'erreurs de transcodage que ceux qui ont une capacité élevée. En outre, plus le transcodage exigeait de règles, plus cette différence était importante. Selon ADAPT chaque règle constitue une étape de transcodage qui augmente le nombre d'éléments stockés temporairement ainsi que le nombre de récupérations. Ainsi, selon Camos (2008), les enfants qui ont une capacité élevée de la MdT peuvent avoir une meilleure performance de transcodage en appliquant les règles pour quatre raisons : (1). Le traitement et l'application des règles peuvent être cognitivement moins coûteux pour ces enfants (Case *et al.*, 1982) puisqu'ils disposent de ressources cognitives suffisantes (Halford, 1993) qui leur permettent d'en libérer certaines pour maintenir les informations intermédiaires issues du système de « parsing » et de l'application des règles. (2). Ces enfants peuvent avoir plus de ressources attentionnelles dédiées au processus de récupération (Barrouillet & Camos, 2001; Gavens & Barrouillet, 2004). (3). Ils peuvent être aussi moins sensibles aux interférences, au cours du traitement de la chaîne numérique verbale (Kane & Engle, 2003) vue la similarité élevée des représentations, ce qui peut faciliter la récupération des formes en chiffres correspondant. (4). leur capacité de stockage elle-même est plus élevée que chez les enfants de faible empan en MdT (Bayliss, Jarrold, Gunn, & Baddeley, 2003; Bayliss, Jarrold, Baddeley, Gunn, & Leigh, 2005). Cette capacité de stockage est importante pour maintenir simultanément la forme verbale entendue, les résultats

de « parsing », les formes en chiffres récupérées et la partie de la chaîne numérique en cours de construction. Ainsi une faiblesse de cette capacité peut influencer l'efficacité du transcodage.

Cet impact de la capacité de mémoire sur le transcodage se reflétait dans la performance des deux groupes de mémoire sur les différentes catégories lexicales. Selon ADAPT le transcodage des nombres dizaines-unités ne doit pas poser plus de difficultés que celui des dizaines. Ces nombres, en raison de leur fréquence et leur âge précoce d'apprentissage doivent être stockés en MLT comme une seule unité représentationnelle et leur transcodage donner lieu à une récupération directe en mémoire des formes correspondant en chiffres et non-plus à un transcodage algorithmique en appliquant plusieurs règles. Toutefois, en début d'apprentissage, les enfants possèdent peu d'unités représentationnelles stockées en mémoire à long-terme (MLT), ce qui les amènent à procéder par un transcodage algorithmique en appliquant plusieurs règles pour transcoder un nombre. Lorsque la capacité de mémoire est faible et que le nombre nécessite des règles pour son transcodage, plus l'application des règles est coûteuse, plus la charge cognitive est élevée et donc plus nombreuses sont les erreurs produites. Ceci était notable dans la performance des enfants du groupe « L » sur les nombres D et DU. Ces derniers avaient plus de difficultés que les enfants du groupe « H » en transcodant les nombres DU que les nombres D indépendamment de leur niveau scolaire. Cette différence de transcodage existait entre les Ds (nécessitant 2 règles) et les DUs (nécessitant 3 règles) chez les enfants de CP classés « L », ainsi qu'entre les Dc (nécessitant 3 règles) et les DUc (nécessitant 3 et 4 règles) chez les enfants de CE1 du groupe « L ». Il est possible que certains enfants aient déjà stocké les formes en chiffres de certains nombres DUs et qu'ils les récupèrent directement en MLT (Camos, 2008). Toutefois, puisque les enfants de notre étude sont en début d'apprentissage, on ne sait pas s'ils passent par la récupération ou par l'algorithme. Seules des mesures chronométriques permettraient de décider ; la récupération en mémoire n'est pas sensible au nombre de règles permettant de transcrire algorithmiquement ces nombres.

Ces résultats prolongent les travaux de Barrouillet *et al.* (2004) portant sur des adolescents présentant des difficultés d'apprentissage. Les résultats de cette étude ont suggéré que ces adolescents utilisaient souvent un transcodage algorithmique, même pour les formes fréquentes, ce qui les conduisait (comme le prédit ADAPT) à produire plus d'erreurs sur les DU que sur les formes D. En outre, l'effet des structures complexes (Dc et DUc) s'avérait très important chez les enfants qui avaient une faible capacité de MdT. Si l'on compare avec les

enfants de CP et de CE1, le transcodage des nombres complexes était impossible en CP alors qu'en CE1 (groupe empan faible) ceci était encore difficile malgré une durée d'apprentissage plus importante. Par contre, chez les enfants de CE1 qui avaient une capacité élevée de MdT, le transcodage de ces nombres complexes ne posait plus de difficulté. Ceci laisse penser que les enfants de CE1 avec faibles capacités de mémoire étaient en retard pour l'apprentissage de ces nombres par rapport à ceux qui avaient une capacité élevée de MdT.

L'analyse **qualitative** des erreurs dans cette étude nous a informé sur cet impact de la MdT sur l'acquisition des règles de transcodage :

Chez les enfants de **CP**, les erreurs produites sur les nombres complexes différaient en quantité entre le groupe « L » et le groupe « H », mais pas en nature (transcodage littéral partiel et complet). Ces deux types d'erreurs observées montrent que ces enfants n'avaient pas encore appris les règles appropriées pour transcoder les nombres complexes, ce qui les conduisait à découper la chaîne numérique verbale dans des unités susceptibles d'être transcodées (par exemple, « quatre-vingt neuf » serait segmenté en « quatre » « vingt » et « neuf » → « 4209 »). La capacité de MdT pourrait cependant affecter l'efficacité de ce transcodage. La limite de cette capacité mémorielle a une influence sur le stockage temporaire de la chaîne numérique verbale, sur la récupération des unités en MLT et sur la construction de la chaîne numérique en chiffres, produisant un coût cognitif élevé pendant le traitement. Ainsi, pour diminuer cette charge cognitive, le transcodage s'arrêterait temporairement, la partie de la chaîne venant d'être construite serait écrite pour permettre de vider la mémoire de travail et de reprendre le traitement. Ce mécanisme peut amener à produire des erreurs de type transcodage littéral complet (*e.g.*, « quatre vingt neuf » transcodé « 4209 ») et partiel. La majorité des erreurs produites par les enfants de CP sur ces nombres complexes correspondaient au transcodage littéral partiel. Ce dernier était plus fréquent chez les enfants à faible capacité de mémoire que chez ceux qui disposaient d'une capacité élevée. Comme nous l'avons prédit, puisque le coût cognitif augmente avec la taille des nombres à transcoder, leur capacité limitée de MdT ralentissait la récupération et augmentait donc l'oubli, ce qui les amenait à produire un transcodage littéral partiel (*e.g.*, « quatre vingt quinze » était transcodé comme « 415 »). Nous avons retrouvé ces types d'erreurs sur les nombres « centaines » à la différence que pour ces nombres, le transcodage littéral complet était plus fréquemment observé, notamment chez les enfants de CP dont la capacité de mémoire est élevée. Les erreurs produites par les enfants de CE1 « L » sur les nombres centaines avaient la même nature de celles produites par les enfants de CP, alors que les enfants de CE1 « H » faisaient

peu d'erreurs sur ces nombres, mais de nature différente (ajouter un zéro après le chiffre 1 de cent, *e.g.*, écrire «4020» pour « quatre cent vingt»). Cette erreur pourrait provenir d'une acquisition récente des règles de transcodage nécessaires pour transcoder les nombres à trois chiffres pour lesquelles le nombre des cases n'est pas encore établi. Cette différence importante entre le groupe «L» et «H» de CE1 montre que les enfants qui ont une faible capacité de MdT étaient en retard pour l'acquisition des règles de transcodage par rapport aux enfants du groupe «H» qui ont le même niveau scolaire mais une capacité de mémoire élevée.

Conclusion

La présente étude avait pour but de vérifier l'impact de la capacité de la mémoire de travail sur le transcodage des nombres au début de l'apprentissage scolaire en se basant sur le dernier modèle de transcodage numérique ADAPT et notamment sa version ADAPT_{BASIC} concernant le transcodage des nombres jusqu'à 99.

Comme nous l'avons vu, la capacité de la mémoire de travail a influencé non seulement l'efficacité du transcodage mais aussi la vitesse de l'acquisition de ses règles. Les différences individuelles de cette capacité mémorielle se manifestent de l'apprentissage des compétences mathématiques élémentaires (comme le transcodage) pourraient expliquer une part des différences de niveau scolaire général en mathématique (Geary, Hamson, Hoard, 2000 ; Hitch et McAuley, 1991 ; Siegel et Ryan, 1989).

La mémoire de travail a un impact important non seulement sur la performance dans des tâches cognitives de haut niveau mais concerne aussi des activités considérées comme simples, telles que le transcodage des nombres.

5

DISCUSSION GENERALE

Nous avons, pour ce travail de recherche, retenu les hypothèses du modèle ADAPT (Barrouillet *et al.*, 2004), concernant le transcodage des nombres de leur forme verbale à leur forme digitale. Ce modèle est le premier à rendre compte du développement parmi les modèles de transcodage des nombres existants. Notre travail de recherche portait sur la genèse du modèle ADAPT_{BASIC} en ce qui concerne les aspects développementaux et l'étendait à la numération dans une perspective inter-linguistique, d'où son originalité. En effet, les modèles développés en neuropsychologie de l'adulte sont inspirés des études de cas réalisées auprès des patients adultes cérébrolésés et comme ils décrivent un système déjà mature, ont des difficultés à expliquer les erreurs de transcodage chez les enfants.

En guise de résumé des informations détaillées dans ce travail, nous tenterons de voir dans quelle mesure les hypothèses du modèle ADAPT sont étayées par les faits. Dans un premier temps, nous rappellerons nos principaux résultats en expliquant de quelle façon ils valident le modèle ADAPT. Nous discuterons ces résultats selon les trois axes principaux de notre thèse : développemental, inter-linguistique et différentiel. Nous terminons en proposant quelques pistes de recherche ultérieures.

Les résultats fournis par nos recherches sont, dans leurs grandes lignes, conformes aux prédictions issues du modèle de transcodage des nombres (ADAPT). Ils montrent que : (1) Le transcodage des nombres de leur forme verbale vers leur forme en chiffres pose certaines difficultés aux enfants en début d'apprentissage. Ces dernières peuvent être causées par plusieurs facteurs, comme nous le verrons plus loin dans cette discussion. (2) L'apprentissage du transcodage demande l'acquisition des procédures qui permettent le passage du code verbal au code en chiffres. (3) Les règles de transcodage sont apprises progressivement et leur usage évolue au cours de l'apprentissage : la confrontation fréquente de certaines formes en chiffres amène à leur stockage en mémoire et à l'abandon de l'utilisation de certaines règles (transcodage algorithmique) qui seraient remplacées par une seule règle de récupération en mémoire. (4) Le transcodage est sensible à la structure verbale du nombre (longueur et transparence), au sens d'énonciation et d'écriture et aux différences individuelles de capacité en MDT. (5) Les procédures doivent être modifiées afin d'adapter ce modèle aux systèmes numériques verbaux de langues différentes (le modèle étant procédural il est flexible et ces modifications sont possibles).

Comme aucune recherche n'avait encore été faite sur la genèse de la version ADAPT_{BASIC} qui concerne les premiers apprentissages des nombres de 1 jusqu'à 99 et les difficultés auxquelles sont confrontés les enfants effectuant le transcodage à ce niveau de développement, nous avons réalisé dans un premier temps une étude exploratoire auprès des enfants français scolarisés en première classe de l'école primaire (CP).

Quelles sont les connaissances de transcodage des enfants à l'âge de 6 ans (en moyenne) scolarisés en CP ?

Notre première étude exploratoire avait comme premier objectif d'explorer les connaissances de transcodage chez les enfants en tout début de l'apprentissage scolaire. Dans cet objectif, et comme la dictée est la meilleure façon pour tester le passage de la forme verbale (orale) du nombre à la forme en chiffres, nous avons réalisé une dictée de nombres, composés essentiellement de 2 chiffres, sur un large échantillon de 187 enfants scolarisés en CP. Au total, les enfants ont produit 69% de bonnes réponses. Nos résultats ont montré qu'assez tôt, au début de l'apprentissage scolaire, les enfants pouvaient transcoder sans difficulté les nombres à un chiffre (les unités) et la majorité des nombres à deux chiffres (P, Ds et DUs). En accord avec ADAPT, ces petits nombres étant assez fréquents, l'enfant a l'occasion de rencontrer souvent leur forme en chiffres dans son environnement ce qui donne lieu à un apprentissage rapide. C'est également le cas pour des grands nombres comme « 100 » et « 1000 », pour lesquels de bonnes performances ont été trouvées, malgré le fait qu'ils n'ont pas été enseignés à l'école (l'enseignement systématique des nombres en CP s'arrête à 99). Ces nombres sont donc stockés assez tôt en mémoire. L'analyse corrélationnelle entre le nombre d'erreurs et la fréquence des formes arabes va également dans ce sens. Elle montre que plus les nombres sont fréquents, moins les enfants produisent d'erreurs. Nous supposons alors que les habilités nécessaires au transcodage sont acquises plus facilement grâce à une exposition aux formes en chiffres arabes. Les enfants seraient capables de reconnaître précocement des chiffres, comme le montre l'étude de Noel (2005). Dans cette expérience, des enfants âgés de 3 à 5 ans devaient juger des signes écrits (chiffres, lettres, symboles) comme appartenant ou non à la catégorie des chiffres. Les résultats ont montré qu'à 3 ans l'enfant répond au hasard. A 4 ans et demi ses performances sont proches de 70% et à 5 ans, les chiffres sont pratiquement tous reconnus correctement (95%) et les autres symboles sont, pour la plupart (74%), rejetés. Néanmoins, même si l'enfant reconnaît le signe écrit comme appartenant à la catégorie chiffre, il a davantage de difficultés à identifier le chiffre en question.

Un développement de la symbolisation des notations numérique avait également été trouvé dans les études de Hughes (1986) ; Sinclair, Mello et Siegrist, (1988), dans lesquelles les auteurs se sont intéressés aux productions écrites spontanées de l'enfant avant tout apprentissage des notations numériques. Ces auteurs montrent que l'enfant passe de représentations idiosyncrasiques et pictographiques à des productions symboliques capturant progressivement la correspondance terme à terme pour aboutir, enfin, à la production de chiffres.

Les difficultés de transcodage en début d'apprentissage :

Le deuxième objectif de notre première étude était de vérifier quelles sont les difficultés auxquelles sont confrontés les enfants en début de l'apprentissage de transcodage.

Les règles de transcodage et la structure numérique verbale:

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction théorique de la thèse, tout transcodage demande déjà la maîtrise du code source et du code cible pour ensuite faire le lien entre les deux codes et pouvoir passer de l'un à l'autre. Le passage de la forme verbale d'un nombre à sa forme en chiffres demande l'application des procédures. Donc une première difficulté peut provenir de la maîtrise insuffisante des règles de transcodage. ADAPT postule que la difficulté de transcodage d'un nombre dépend du nombre de règles nécessaires. Plus un nombre a besoin de règles pour être transcodé plus son transcodage est difficile. Ceci a été confirmé dans l'étude d'ADAPT (Barrouillet *et al.*, 2004) auprès des enfants en deuxième et troisième années de l'école primaire²⁴ et a été retrouvé dans notre recherche auprès des enfants plus jeunes en appliquant les règles d'ADAPT_{BASIC} pour les nombres de 1 à 99 et d'ADAPT_{ADV} pour les nombres « centaines » et « mille ». Ainsi, nos résultats ont montré que plus un nombre avait besoin de règles pour être transcodé, plus le nombre d'erreurs était élevé ($p < .001$).

Globalement, selon nos résultats, les règles de transcodage d'ADAPT concernant les nombres à deux chiffres, composés de un (les nombres de « un » jusqu'à « seize ») et de deux primitives lexicales (les nombres de « dix-sept » jusqu'à « soixante-neuf »), semblaient être acquises par les enfants de CP. Par contre, les règles nécessaires au transcodage des nombres dizaines complexe (« Dc » et « DUC » en français composés de deux à quatre primitives

²⁴ Les auteurs d'ADAPT ont montré que les erreurs produites par les enfants dans leur étude développementale (Barrouillet *et al.*, 2004, p.378) sont plus fortement corrélées avec les règles du modèle ADAPT (LD & ADV) que les règles proposées par le modèle de Power et Dal Martello (1990 et 1997).

lexicales) n'étaient pas encore apprises, ces nombres posaient une difficulté importante aux enfants. Les erreurs étaient en majorité syntaxiques et correspondaient principalement au transcodage littéral partiel. Par ailleurs, comme les nombres à 3 chiffres ne font pas partie de l'enseignement systématique en CP et ont besoin de règles de transcodage spécifiques, ces nombres étaient difficiles à transcoder pour les enfants et amenaient à produire une quantité d'erreurs importante, dont la grande majorité étaient syntaxiques (82%). Ces erreurs correspondaient principalement au transcodage littéral complet où chaque élément de la suite dictée est transcrit comme un nombre isolé.

D'autre part, nous n'avons pas trouvé de différence significative entre les formes Ds et DUs, malgré un nombre de règles de transcodage différent. En accord avec les prédictions d'ADAPT, nous pensons que ces formes donnaient lieu, avec l'apprentissage, à une récupération directe en mémoire des formes en chiffres correspondantes. Ce fait indique un processus développemental qui ne peut pas être expliqué par les modèles de transcodage sémantique qui supposent que le transcodage des DU demande toujours plus de règles que celui de D.

D'autres facteurs comme *le nombre de chiffres* ont aussi influencé le transcodage. Plus un nombre comprenait de chiffres, plus son transcodage était difficile et plus le nombre d'erreurs était élevé ($p < .001$). Ceci prolonge les résultats de l'étude de Fayol, Barrouillet et Renaud (1996) qui ont également trouvé cet effet mais auprès des adolescents transcodant des nombres de 2 à 6 chiffres.

L'impact de la structure verbale :

Les résultats de notre première étude auprès des enfants français, ont montré que les difficultés apparaissaient sur les nombres Dc et DUc (spécifiques à la langue française) et les nombres à trois chiffres (les nombres centaines). La difficulté de transcodage observée sur les nombres complexes en français était à peu près égale à la difficulté observée sur les nombres à 3 chiffres (pourcentage d'erreurs 55% et 65% respectivement), sachant que ces derniers ne font pas partie de l'enseignement systématique en CP. Cette difficulté observée sur les formes complexes spécifiques au système français de France s'est traduite par un pourcentage d'erreurs bien plus élevé sur ces nombres que sur les nombres à deux chiffres inférieurs à 70 mais aussi par des erreurs de nature différente, une difficulté qui persiste même à un niveau scolaire plus élevé (Seron et Fayol 1994 ainsi que Barrouillet *et al*, 2004). Ce n'est qu'à partir

de 8 ans que ces formes complexes seraient stockées en mémoire par les enfants. Ceci fait que les jeunes français sont en retard dans l'apprentissage de ces nombres.

Pourquoi les nombres de 70 à 99 en français, pourtant composés de deux chiffres comme les nombres plus petits, inférieurs, s'avèrent aussi difficiles à transcoder et posent des difficultés aux enfants français en début d'apprentissage ?

Une première difficulté dans l'acquisition de la numération orale vient de **l'absence de transparence** des systèmes numériques verbaux occidentaux en général et français plus particulièrement. Ce manque de transparence rend plus tardive la maîtrise du système par les enfants occidentaux par rapport aux enfants d'Asie qui disposent d'un système verbal plus transparent. Toutefois, une fois que le lien entre cardinalité et dénomination est automatisé, les problèmes deviennent négligeables et même disparaissent. Nous avons remarqué, dans notre première étude chez les enfants Français, qu'ils n'avaient pas une grande difficulté pour transcoder les petits nombres allant jusqu'à 69 pour lesquels la dénomination est relativement régulière, alors qu'à partir de ce nombre les difficultés apparaissaient.

Nous avons vérifié l'hypothèse que la **longueur phonologique** de la forme verbale du nombre peut affecter son transcodage en chiffres. Dans notre première étude, nous avons évalué cet impact de la longueur phonologique (évalué en nombre de mots) des nombres sur leur transcodage en chiffres. Effectivement, nous avons observé un effet important du nombre de mots sur le nombre d'erreurs de transcodage. Plus un nombre contenait de mots dans sa forme verbale, plus les enfants produisaient des erreurs de transcodage. Nos résultats rejoignent les observations de Fayol, Barrouillet et Renaud (1996) qui ont trouvé un effet de la longueur phonologique de la forme verbale (évalué en nombre de syllabes) sur le transcodage. Ces résultats les ont amenés à suggérer l'idée d'impliquer la mémoire de travail dans un modèle asémantique de transcodage des nombres. Ceci a été réalisé dans le modèle ADAPT qui considère que la mémoire constitue une structure nécessaire à la mise en œuvre correcte du système de transcodage et que la capacité limitée de la mémoire devrait être un facteur contraignant le transcodage (*cf. infra*). Ainsi lorsque cette forme verbale est longue phonologiquement ceci va augmenter le coût de son stockage temporaire (buffer phonologique dans le modèle) et par conséquent le coût de son traitement par les règles.

Ainsi le modèle de McCloskey qui postule une représentation sémantique indépendante du format d'entrée (ou de présentation) ne peut pas expliquer ces observations chez les enfants (voir aussi Lochy, Pillon, Zesiger et Seron, 2002).

Parmi les modèles sémantiques, le modèle de Power et Dal Martello (1990) permet de prendre en considération la forme verbale du nombre²⁵. Toutefois, comme ce modèle a été élaboré à partir des observations chez des enfants Italiens, qui n'ont donc pas les structures numériques verbales complexes de français, ce modèle ne peut pas expliquer les erreurs produites sur les nombres complexes en français et reste limité. En outre, comme ce modèle a été élaboré à partir des observations chez des enfants âgés de (7 ans en moyenne) qui n'ont pas produit d'erreurs sur les nombres à 2 chiffres, ceci ne permet ni de comprendre comment les enfants transcendent ces nombres basiques en début de l'apprentissage ni la comparaison avec nos observations.

Nous rappelons que dans ADAPT, le transcodage des nombres a été décrit précisément. Chaque nombre dans sa forme verbale exige une séquence de règles qui permet son transcodage dans sa forme en chiffres. Les règles de transcodage sont élaborées directement sur la forme verbale du nombre. Le modèle propose des règles spécifiques pour transcoder les nombres complexes français dans ses deux versions (ADAPT_{BASIC} et ADAPT_{LD}). Ainsi ADAPT permet d'expliquer les erreurs produites sur ces nombres en référant également à l'implication des autres composants du système cognitif dans cette activité de transcodage : la mémoire de travail.

Dans notre travail de recherche, l'observation des erreurs essentiellement syntaxiques prolonge ce qui a été montré dans des études précédentes (Power et Dal Martello, 1990 ; Seron, Deloche et Noël 1991 ; Barrouillet *et al*, 2004) auprès des enfants âgés entre 7 et 9 ans effectuant une tâche de transcodage sur des nombres plus grands. Notre étude chez les enfants de CP a montré que ces erreurs syntaxiques étaient nombreuses sur les nombres complexes en français et les nombres à trois chiffres. Par contre, un faible pourcentage d'erreurs syntaxiques a été observé sur les formes numériques simples, c'est-à-dire les particuliers, les dizaines et les dizaines-unité simples par rapport aux formes complexes. Selon ADAPT, ces erreurs syntaxiques reflètent une utilisation du transcodage algorithmique qui sera utilisé lorsqu'une récupération directe en mémoire de la forme en chiffres correspondant à un nombre donné échoue. Ceci indiquerait que les formes numériques simples ont été traitées comme des unités par le processus de parsing (*i.e.*, la forme correspondante en chiffres est disponible en mémoire) et ont été associées directement à leur forme en chiffres. Leur transcodage a donc

²⁵ Il suppose qu'une représentation sémantique sera élaborée à partir de la forme verbale et les règles s'appliquent ensuite sur cette représentation pour construire le nombre correspondant en chiffres.

simplement exigé l'application d'une seule règle de récupération de leur forme en chiffres en mémoire à long-terme.

L'acquisition de transcodage

Dans notre première étude auprès des enfants de CP, un effet de l'ordre d'apprentissage se manifestait par une augmentation des erreurs liées à la structure lexicale (ou la catégorie lexicale des nombres) en commençant par les unités, les particuliers, les dizaines et les dizaines-unités simples (Ds, DUs) et enfin les dizaines et les dizaines-unités complexes (Dc, DUc). Ce qui peut indiquer que l'enfant apprend les nombres en les organisant dans des catégories lexicales.

Dans notre deuxième étude (partie 2.4), nous avons testé plus spécifiquement la genèse d'ADAPT_{BASIC} et montré comment se met en place le transcodage des nombres jusqu'à 99 chez des enfants âgés de 5 à 7 ans. Notre étude prolonge donc l'étude développementale effectuée par les auteurs d'ADAPT (Barrouillet *et al.*, 2004) qui a porté sur des enfants âgés de 8-9 ans et qui a testé la version ADAPT (LD et ADV). Pour ce faire, nous avons effectué une étude longitudinale (trois passations par niveau scolaire) avec des enfants français scolarisés en dernière année d'école maternelle (GS) et des enfants en cours préparatoire (CP). Ce suivi au cours de l'année scolaire nous a permis de suivre l'évolution du système de transcodage au cours de la période de développement et d'apprentissage étudiée. Nous avons vérifié l'hypothèse d'un processus développemental marqué par le passage de l'algorithme à la récupération en mémoire, et donc une augmentation de l'efficacité du transcodage. On s'attendait à ce que les enfants de GS et de CP diffèrent non seulement dans le taux d'erreurs produites mais aussi dans la nature de ces erreurs. Cette différence devait refléter le stade développemental atteint par leur système de transcodage en faisant l'hypothèse que les différents types d'erreurs indiqueraient les règles de transcodage utilisées. Ainsi, pour chaque catégorie lexicale il était question de voir quelles étaient les règles déjà acquises et celles qui n'étaient pas encore mises en place, notamment pour les catégories complexes (Dc, DUc) pour lesquelles notre première étude avait révélé un certain nombre de difficultés. Les résultats ont révélé une amélioration importante de la performance de transcodage au cours des passations et entre les deux niveaux scolaires. Cette amélioration reflétait une installation progressive du système de transcodage. Ce système n'était pas encore installé chez les enfants de GS qui possédaient un lexique numérique limité et n'avaient pas encore établi la correspondance entre les formes numériques verbales et celles en chiffres, notamment lors de

la première passation. Toutefois, leur performance de transcodage a évolué au cours des passations pour arriver, lors de la dernière passation, à transcoder les nombres de 1 à 10 et à progresser sur les autres structures (P, DUs). Nous avons également noté une diminution importante de leurs non-réponses. Pour ces enfants qui n'avaient pas encore reçu un enseignement systématique des nombres, nous avons observé des différences individuelles importantes. Par contre, chez les enfants de CP, une partie importante de ce système a été intégrée et les nombres qui présentaient des difficultés aux enfants de GS (comme les nombres particuliers, Ds et les DU simples) n'en posaient plus aux enfants de CP notamment lors de la dernière passation. Ainsi, conformément aux prédictions du modèle ADAPT, le lexique numérique croissait et de nouvelles connaissances (unités représentationnelles) étaient stockées en mémoire à long-terme. Selon ADAPT_{BASIC}, en début d'apprentissage, ces connaissances en MLT associent chaque primitive à sa catégorie ou classe lexicale. La nature des erreurs commises par les enfants de GS au cours des passations a montré que ces enfants étaient encore dans la phase des connaissances déclaratives qu'ils n'avaient pas encore transformées en procédures par un processus de compilation des analogies comme le suppose le modèle ACT-R d'Anderson (1993) repris par le modèle ADAPT. Par exemple, si l'enfant savait écrire 17, il ne savait pas nécessairement écrire 18 en remplaçant le 7 par 8. Par contre, la nature des erreurs des enfants de CP, en majorité syntaxique (notamment sur les structures complexes) reflétait certaines acquisitions des règles de transcodages. Bien qu'ils n'aient pas encore acquis les règles appropriées pour transcoder ces nombres, les types d'erreurs constatées sur ces structures complexes reflétaient un emploi des règles qui étaient utilisées pour transcoder des structures plus simples. Ils essayaient donc par analogie de transcoder les structures les plus complexes. Ainsi, comme le suggère le modèle ADAPT, les procédures sont créées en compilant le calcul de l'analogie et en remplaçant donc les valeurs spécifiques des nombres par des variables (généralisation). Nos résultats ont montré une intégration progressive des règles de transcodage au cours de l'apprentissage.

Par ailleurs, comme nous l'avons déjà souligné et testé dans notre première étude, ADAPT prédit qu'avec l'apprentissage, des formes numériques simples comme les D et DU seraient stockées en mémoire et que leur transcodage donnerait lieu à une récupération directe des formes correspondantes en chiffres. Par conséquent, le transcodage des nombres DU ne devrait pas être plus difficile que celui des nombre D. Nous avons testé cette hypothèse dans notre première étude et nous l'avons à nouveau testée dans l'étude longitudinale auprès des deux niveaux scolaires GS et CP sur les catégories communes Ds et DUs. Comme nous

l'avons prédit, les résultats ont montré une différence entre la performance des enfants de GS et celle des enfants de CP sur ces catégories. En général, ces nombres étaient difficiles à transcoder pour les enfants de GS et donnaient lieu à un pourcentage d'erreurs important (environ 40% en 3^{ème} passation), alors que ces nombres étaient faciles à transcoder pour les enfants de CP qui y ont produit peu d'erreurs (environ 5%). En outre, le transcodage des « DUs » était significativement plus difficile que celui des « Ds » chez les enfants de GS, ce qui n'était pas le cas chez les CP où nous n'avons pas observé de différence significative entre les dizaines-simples « Ds » et les dizaines-unités simples « DUs ». Ces résultats confirment les prédictions d'ADAPT. Ainsi, les enfants de GS qui sont au tout début de leur apprentissage des nombres stockent progressivement des unités représentationnelles et commencent à acquérir les règles de transcodage décrites par ADAPT_{BASIC}. À ce stade de leur développement, les GS n'avaient pas encore stocké en mémoire à long terme les « DUs » comme des unités représentationnelles pouvant être récupérées directement, mais ces dizaines unités simples donnaient encore lieu à un transcodage algorithmique passant par l'application de règles, donc sujettes à la production de taux d'erreurs élevés. A l'inverse, pour les enfants de CP qui ont reçu un enseignement systématique, ces formes fréquentes (DUs) ont été stockées en mémoire à long-terme comme des unités représentationnelles qui ont donc permis une récupération directe en mémoire de leur forme plutôt qu'un transcodage algorithmique. Ce qui a augmenté l'efficacité du système de transcodage sur ces structures par rapport aux structures complexes.

Nos résultats confirment donc les prédictions du modèle ADAPT_{BASIC} concernant la création des procédures, l'évolution du lexique et le passage d'un transcodage algorithmique à la récupération en mémoire des formes en chiffres. Les erreurs produites par les enfants étaient explicables par le modèle ADAPT.

Transcodage et différences linguistiques :

Notre troisième étude avait pour objectif de tester l'impact de la structure linguistique et plus particulièrement du sens de l'énonciation du nombre, ainsi que le sens d'écriture, sur la performance de transcodage chez des enfants au début de leur apprentissage scolaire. De plus, vu la diversité des systèmes numériques verbaux, un modèle de transcodage devrait être applicable dans toutes les langues. Ainsi notre étude avait également comme perspective de chercher une validation interculturelle (inter-langue) du modèle ADAPT (notamment sa version BASIC) et de proposer, à la lumière de nos résultats, les modifications nécessaires pour qu'il puisse rendre compte des spécificités du système numérique verbal dans différentes

langues. Pour ce faire, nous avons suivi une approche interculturelle en comparant le transcodage des nombres auprès des enfants Français, Allemands et Syriens en première année de l'école primaire.

Nous avons prédit que les erreurs produites par les enfants Allemands et Syriens seraient différentes de celles produites par les enfants Français. Une différence de traitement serait due à la contradiction entre l'ordre d'énonciation des nombres et le sens d'écriture existant dans les systèmes allemand et syrien. Pour vérifier cette prédiction, nous avons administré une tâche de dictée de nombres à deux grands échantillons d'enfants en Allemagne et en Syrie scolarisés en première année de l'école primaire.

Comme prédit, les résultats ont confirmé l'influence des propriétés linguistiques des systèmes numériques verbaux sur le transcodage numérique. Concernant les enfants Français, les irrégularités du système numérique verbal français, notamment à partir du nombre « soixante-dix » et jusqu'à « quatre-vingt dix neuf », leur ont posé des difficultés de transcodage et donc ont provoqué un retard d'apprentissage par rapport à leur pairs Allemands et Syriens. Par ailleurs, et conformément à nos prédictions, la contradiction entre l'ordre de l'énonciation et le sens de l'écriture de certains nombres a influencé négativement la performance de transcodage des enfants Allemands et Syriens. Nos résultats rejoignent ceux de l'étude de Zuber *et al.*, (2009) qui ont relevé les difficultés posées par l'inversion d'énonciation des nombres DU sur la performance du transcodage numérique chez des enfants Autrichiens germanophones dont l'âge moyen est de 7 ans.

Par ailleurs, concernant les nombres supérieurs à 100, qui ne font pas partie de l'enseignement systématique au niveau scolaire étudié, nous avons prédit qu'en début d'apprentissage, ces nombres peuvent poser davantage de difficultés spécifiques de transcodage aux enfants Syriens qu'aux enfants Allemands. Ces nombres ont globalement un sens d'énonciation et d'écriture en chiffres qui va de gauche à droite, donc contre le sens d'écriture en arabe mais alterne parfois dans le même nombre (ex : « 125 » énoncé comme « cent cinq et vingt »). Conformément à nos prédictions, les enfants Syriens ont rencontré de grandes difficultés en transcodant ces nombres. Leurs erreurs ont montré une difficulté liée au changement du sens d'écriture (*e.g.*, écrire « 13100 » pour « 113 ») renforcées par le fait qu'ils ne disposaient pas encore des règles nécessaires pour transcoder ces nombres.

Nos résultats ont montré que les procédures du modèle ADAPT ne sont pas complètement compatibles avec les langues qui inversent l'ordre d'énonciation des dizaines et des unités ou

celles qui ont un sens d'écriture différent (de droite à gauche). Ainsi, nous avons proposé les modifications nécessaires à apporter sur les règles de sa version « BASIC » concernant le transcodage des nombres de 1 à 99. Les règles que nous avons proposées prennent en considération la contradiction entre le sens d'énonciation (ex : l'énonciation des nombres DU en allemand et en arabe commence par l'unité suivie par la dizaine) et le sens d'écriture dans les deux langues étudiées (de gauche à droite en allemand et l'inverse en arabe).

Les deux modèles « BASIC », allemand et arabe (syrien), proposés se ressemblent généralement avec une petite différence dans les règles qui gèrent la contradiction avec le sens d'écriture qui s'applique à des structures lexicales différentes dans les deux langues (DU en allemand, D en arabe). En outre, la mémoire de travail jouera un rôle plus important (additionnel) dans le modèle allemand que dans le modèle syrien.

Concernant les nombres séparateurs « cent » et « mille », dont le sens d'écriture contredit aussi le sens général d'écriture dans la langue arabe, nous avons proposé également des modifications sur les règles concernant le transcodage de ces nombres dans la version correspondante « ADAPT_{ADV} ».

Ces résultats vont plutôt dans le sens d'une nature asémantique du transcodage et soutiennent la présomption de l'indépendance relative du modèle ADAPT, qui est asémantique et procédural, par rapport aux particularités linguistiques (organisation lexicale sémantique du système numérique verbal ou représentation sémantique de la quantité). Néanmoins, comme nous l'avons déjà évoqué, ce modèle rend compte de la différence de traitement liée à la forme linguistique (*i.e.*, « douze cent » est traité différemment de « mille deux cent »). Ainsi, avec certaines modifications sur ces règles, il peut rendre compte du transcodage dans différents systèmes numériques verbaux, tandis que les modèles sémantiques comme ceux de McCloskey (1987) ou de Power et Dal Martello (1990) ne peuvent pas rendre compte de toutes les erreurs observées chez les enfants en fonction de la diversité de leur systèmes numériques verbaux.

En outre, comme le modèle ADAPT prend en considération l'influence de la mémoire de travail, il est plus apte à rendre compte des erreurs observées. Ce point a été testé dans notre dernière étude.

L'impact de la capacité de la mémoire de travail

Nous rappelons que le système de transcodage décrit par ADAPT est intégré dans l'architecture générale du système cognitif. Il suggère que des composants spécifiques au système de transcodage (comme le parsing, le système de production ou encore le registre des formes en mémoire à long terme) utilisent des composants non spécifiques du système cognitif, comme par exemple la mémoire phonologique à court terme ou encore la mémoire de travail. Des difficultés de transcodage peuvent donc parfois provenir des contraintes cognitives générales liées au fonctionnement du système comme la mémoire de travail (MDT).

Les résultats de nos études précédentes ont montré que le nombre de mots composant la forme verbale du nombre ainsi qu'une contradiction entre ordre d'énonciation et sens d'écriture avaient un effet négatif sur son transcodage en début d'apprentissage.

Ainsi, notre dernière étude, avait comme objectif de tester l'impact des capacités mémorielles sur le transcodage et sur l'acquisition des règles chez les enfants en début d'apprentissage scolaire. Nous avons supposé que les différences inter-individuelles de la capacité de MDT peuvent faciliter ou freiner l'apprentissage du transcodage au début de la scolarité. Ces capacités de MdT ainsi que le stockage et la récupération en MLT influencent l'efficacité du transcodage algorithmique. Nous avons testé des enfants français provenant de deux niveaux scolaires : des enfants de CP en début de leur apprentissage scolaire, ainsi que des enfants de CE1 qui ont un niveau de développement plus élevé. En outre nous avons comparé le transcodage des enfants qui ont une bonne capacité de MdT et ceux qui ont une capacité faible.

Conformément aux prédictions, les résultats ont montré une influence des capacités mémorielles sur l'efficacité de transcodage et aussi sur la vitesse d'acquisition de ses règles. Les enfants qui avaient une bonne capacité de MdT ont montré une performance meilleure de transcodage que ceux qui avaient une capacité faible. Cette différence de performance s'accroissait en fonction du nombre de règles de transcodage à appliquer. Ce sont les aspects procéduraux (pouvant être cognitivement très coûteux), qui sollicitent fortement la mémoire de travail. Ainsi, lorsque le transcodage passe par la récupération directe des informations en MLT (application d'une seule règle), le coût cognitif du traitement est moins élevé et les différences interindividuelles disparaissent. En outre, les traitements qui s'automatisent avec l'âge (comme par exemple le transcodage des formes DU), nécessiteraient de moins en moins

de ressources attentionnelles. L'attention pourrait donc s'orienter davantage vers les items à maintenir en mémoire à court terme (Gavens & Camos, 2006). Toutefois, dans les systèmes numériques verbaux de certaines langues, où le sens d'énonciation de certains nombres contredit le sens d'écriture, la mémoire du travail est davantage sollicitée. Nous avons montré précédemment dans notre étude comparative que le modèle ADAPT_{BASIC} allemand fait davantage appel à la MdT par rapport au modèle ADAPT_{BASIC} français ou anglais. Pour effectuer le transcodage dans ce système, non seulement la séquence des éléments lexicaux doit être mémorisée et associée à une syntaxe appropriée mais aussi cette séquence doit être manipulée. Par exemple « vingt-cinq » en français s'écrit successivement « 2 » pour « vingt » puis « 5 » pour « cinq », alors qu'en allemand la séquence des éléments lexicaux doit être mémorisée « cinq et vingt » mais elle ne peut pas être transcrite directement en écrivant « 5 » puis « 2 » successivement comme en français.

Dans son étude auprès des enfants Français, Camos (2008) a suggéré que la différence qualitative des erreurs produites par les deux groupes de mémoire (H et L²⁶) n'est pas uniquement attribuable à la capacité de stockage des informations numériques, mais est probablement plus générale (*i.e.*, l'efficacité des règles, le stockage et la récupération, p.52). Elle a en outre mentionné que le test de « counting span » qu'elle a utilisé n'est pas le meilleur prédicteur dans le domaine de la cognition numérique par rapport aux autres tests de MdT non-numériques (Barrouillet & Lépine, 2005), et que ses résultats ne permettaient pas de localiser exactement la source des différences individuelles observées.

Dans notre étude, la mémoire de mots en ordre inverse, considérée comme mesure de la capacité du central exécutive, était le meilleur prédicteur des erreurs de transcodage produites chez les enfants de CP avec en deuxième, la mémoire de chiffres en ordre direct (donc la boucle phonologique) alors que chez les enfants de CE1 le seul prédicteur obtenu était la mémoire de mot en ordre inverse. Ces résultats rejoignent ceux de Zuber *et al.*, (2009) qui ont cherché à identifier plus précisément quel composant de la MdT influence notamment les erreurs dues à l'inversion d'énonciation des DU dans le système numérique verbal allemand. Ils ont trouvé que l'administrateur central était le meilleur prédicteur de la performance de transcodage (notamment en ce qui concerne les erreurs d'inversion) ainsi que la mémoire visuo-spatiale pour les autres types d'erreurs observées.

²⁶ H signifie le groupe qui a une bonne capacité de mémoire de travail, L signifie le groupe qui a une capacité faible de mémoire de travail

Synthèse :

En guise de résumé, outre la maîtrise des opérations mathématiques élémentaires, l'enfant doit s'approprier les codes numériques et le passage d'un code à l'autre notamment du code verbal vers le code digital (en chiffres). L'ensemble des données présentées au cours de cette thèse montre l'importance d'aborder le transcodage des nombres dans une perspective dynamique évolutive qui permet de rendre compte des processus d'apprentissage chez les enfants. Ainsi, une recherche dans le domaine de l'acquisition de la numération écrite est très importante vu la rareté des études qui ont été faites, mais surtout parce que cette acquisition constitue un pré-requis non seulement pour lire et écrire les nombres dans le code digital, mais aussi pour l'acquisition des algorithmes basiques de calcul (Resnick, 1983). Un modèle de transcodage doit donc être capable d'expliquer l'acquisition de cette faculté en considérant en même temps les différences inter-linguistiques qui résultent de la variation des systèmes numériques verbaux, ainsi que des différences individuelles de la capacité de MdT. Notre travail de recherche a confirmé que le modèle ADAPT, à la différence des modèles précédents, prend en considération les aspects développementaux du transcodage en expliquant les processus cognitifs à mettre en œuvre en début d'apprentissage et l'évolution du système de transcodage de l'algorithme à la récupération. Certes, le modèle ADAPT dans sa forme actuelle ne peut pas rendre compte du transcodage dans tous les systèmes numériques verbaux, notamment ceux où il peut y avoir une contradiction entre ordre d'énonciation de certains nombres et sens d'écriture. Toutefois, le fait que ce modèle soit procédural et asémantique permet, avec la modification de certaines procédures à appliquer, de s'adapter au transcodage dans de tels systèmes numériques verbaux (exemples étudiés : les systèmes allemand et syrien).

Par ailleurs, les modèles de transcodage des nombres tels ceux de Deloche et Seron, (1982), McCloskey (1992) ou Power et Dal Martello, (1990) admettent peut-être que l'entrée verbale (orale) doit être maintenue temporairement avant d'être transcodée. Toutefois, ils manquent de précision sur les processus cognitifs sous-tendant un tel effet. Plus précisément, ces modèles ne mentionnent pas explicitement un rôle potentiel de la MdT dans les activités de transcodage. Par contre, ceci est bien mentionné dans le modèle ADAPT qui prédit un effet de la MdT sur la performance de transcodage. La capacité de MdT peut affecter chaque étape du processus de transcodage tel que la récupération des informations en MLT, le stockage temporaire des informations issues du « parsing » et l'efficacité des procédures (ou des règles). Notre travail de recherche a confirmé cet impact des capacités mémorielles sur

l'efficacité de transcodage et aussi sur l'acquisition de ses règles chez les enfants en début de l'apprentissage scolaire.

Le débat entre sémantique et asémantique :

Selon Noël (2005, p. 118), « le débat entre transcodage sémantique ou asémantique n'est pas résolu » (cf. Seron & Noël, 1995, Lochy, Pillon, Zesiger et Seron 2002 ; Lochy, Domahs, Bartha & Delazer, 2004). « En neuropsychologie, les preuves les plus fortes en faveur de l'existence de mécanismes asémantiques du transcodage proviennent de la description de patients avec acalculie acquise qui sont capables de comprendre et de produire des nombres mais pas de les transcoder correctement. Le profil inverse, *i.e.*, une bonne performance en transcodage malgré un déficit en compréhension et en production de nombres, n'a pas encore été rapporté » (Noël, 2005).

Chez l'enfant, la première tentative pour éclairer ce débat vient de Jarlegan, Fayol et Barrouillet (1996) qui ont montré que le transcodage du code verbal en chiffres ne passe pas nécessairement par l'activation d'une représentation sémantique du nombre (cf. 2^{ème} partie). Plus récemment le modèle ADAPT de Barrouillet *et al.*, 2004, a montré qu'il est mieux placé pour rendre compte du transcodage des nombres que les modèles qui le précèdent et ceci chez les enfants d'école primaire, chez les adolescents en difficulté d'apprentissage et même pour plusieurs cas des patients cérébrolésés décrits dans la littérature de neuropsychologie (Camos & Barrouillet, 2008).

Loosbroek, Dirx, Hulstijn et Janssen (2009) ont étudié le transcodage du code verbal au code en chiffres auprès des enfants Belges Flamands âgés de 9 ans en moyenne (14 avec des difficultés en arithmétiques et 15 enfants ordinaires qui constituaient le groupe contrôle). A la différence de la méthode utilisée habituellement pour étudier le transcodage du code verbal en chiffre (une dictée de nombres permettant l'analyse des erreurs), les auteurs ont étudié les patterns temporels de production des nombres (le temps avant d'écrire chaque chiffre a été enregistré, voir aussi Lochy, Pillon, Zesiger, & Seron, 2002). L'objectif de cette étude était de vérifier si les enfants qui ont des habilités faibles et ceux qui ont des habilités normales en arithmétique diffèrent en transcodant des nombres de leur forme verbale à leur forme en chiffres arabes. Les résultats de l'étude ont montré que les enfants avec des faibles capacités arithmétiques étaient plus lents en transcodant les nombres que les enfants avec des habilités normales et ont traité ces nombres différemment. Un effet de la taille du nombre a été observé

chez les enfants avec des faibles capacités arithmétiques en comparant leur temps de transcodage sur des petits et des plus grands nombres, ceci pour les nombres à 1 chiffre (divisés en deux groupes : nombres inférieurs et supérieurs à 5), les nombres à 2 chiffres, à 3 et à 4 chiffres. Cet effet était moins important chez les enfants qui ont une capacité arithmétique normale, notamment pour les nombres à un chiffre et à deux chiffres. Les auteurs supposent qu'en début de leur développement, les enfants effectuent le transcodage de la forme verbale à la forme en chiffres en passant par le sens des unités composant le nombre. Dans ce sens, les codes sont limités aux nombres à un chiffre (les unités). Sous l'effet d'un traitement fréquent de ces nombres, avec l'apprentissage et le développement, le transcodage deviendrait plus rapide et s'automatiserait en passant par une récupération directe en mémoire. Ainsi, selon les auteurs, les voies sémantiques deviennent graduellement asémantiques parce que les grands nombres sont composés des petits. Au cours du développement, seulement les voies sémantiques semblent se développer et c'est à la base du fonctionnement de ces voies que les voies asémantiques émergent pour les mêmes nombres. Ainsi, un échec à développer une voie asémantique pour les petits nombres empêche à son tour un transcodage rapide des grands nombres. Les auteurs pensent, vu la gamme des nombres utilisés à l'âge de 9 ans (comme les enfants de leur étude), que seulement des modèles mixtes (sémantiques et asémantiques) pourraient décrire la performance de transcodage.

En effet, comme le précisent les auteurs du modèle ADAPT, la nature asémantique du modèle n'élimine pas le fait qu'une représentation sémantique puisse être construite en parallèle à partir de la forme verbale, mais ce n'est pas à la base de cette représentation que l'écriture du nombre en chiffres sera effectuée. En effet, certes nos expériences n'avaient pas pour objectif de tester les aspects sémantiques ou asémantiques du transcodage, mais nous pensons que les résultats fournis par notre recherche, et notamment la nature des erreurs produites par les enfants Allemands et Syriens sur les nombres DU, suggèrent qu'une production correcte de ces nombres ne reflète pas une compréhension profonde du système positionnel arabe mais bien plutôt l'application de procédures qui ne sont pas sous-tendues par des connaissances conceptuelles. Il nous semble donc que ce modèle reste pour le moment plus compatible que ses prédécesseurs pour rendre compte du transcodage, dans une perspective non seulement fonctionnelle (impliquant plusieurs structures du système cognitif), mais aussi dynamique ou développementale.

Préconisations :

1. Comme l'ont montré les résultats de notre recherche chez les enfants de CP en France, ces enfants ont des difficultés à transcoder les dizaines et les dizaines-unités complexes. Cette difficulté provoque un retard dans l'acquisition de ces nombres par rapport aux nombres simples et aussi par rapport à leurs pairs Belges ou Suisses qui utilisent une dénomination plus régulière pour ces nombres. Ainsi, nous pensons que remplacer l'énonciation des nombres « soixante-dix » par « septante », « quatre-vingt » par « huitante », « quatre-vingt dix » par « nonante » - comme c'est le cas en Belgique et en Suisse - faciliterait l'accès à la classe lexicale de ces nombres pour les transcoder et permettrait aux enfants de surmonter les difficultés posées par l'énonciation obscure existant notamment en début d'apprentissage.

2. Dans le système actuel, pour aider les enfants en début d'apprentissage à surmonter cette difficulté, et à la lumière du modèle ADAPT, les enseignants pourraient entraîner davantage les enfants à transcoder ces nombres complexes tout en suivant les procédures proposées par le modèle ADAPT et en renforçant en même temps le lien entre le mot nombre et la forme digitale. Par exemple, pour les nombres entre « soixante-dix » et « quatre-vingt », l'enseignant pourrait entraîner les enfants à attendre l'entrée lexicale suivante. Lorsque cette entrée est un nombre situé entre 11 et 19, l'enfant doit écrire « 7 _ » et placer la valeur positionnelle de cette nouvelle entrée (ex pour « quatorze : 4 ainsi « soixante quatorze » s'écrit « 74 »).

3. Concernant la contradiction entre l'ordre d'énonciation et le sens d'écriture de certains nombres dans les systèmes numériques verbaux allemand et syrien, la mémoire de travail est sollicitée davantage pour stocker temporairement en MCT la première entrée entendue en traitant en même temps la deuxième. Ainsi, nous pensons que pour alléger la charge mémorielle due à cette contradiction, on peut entraîner les enfants Allemands, par exemple, à commencer par écrire l'unité énoncée en premier et puis revenir écrire le chiffre des dizaines énoncé en deuxième pour les nombres « DU ». Comme nous l'avons constaté, malgré une contradiction du sens d'écriture en arabe, l'écriture des nombres dizaines étaient moins problématiques pour les enfants Syriens que l'écriture des nombres DU pour les enfants Allemands, puisque ces nombres contiennent dans leur forme verbale une seule unité lexicale. Par ailleurs, les nombres centaines restent difficiles pour les enfants Syriens en début d'apprentissage car ils demandent plusieurs changements de sens d'écriture lorsque le nombre contient un DU (ex : 125). Ainsi, nous pensons que la mémoire visuo-spatiale pourrait jouer

un rôle important dans cet apprentissage et ceci mériterait d'être étudié plus en détail dans des recherches futures (*cf. infra*).

En outre, à la lumière de nos résultats et en accord avec ADAPT, nous pouvons suggérer l'utilité de se focaliser sur l'automatisation et la récupération directe en MLT dans l'acquisition du transcodage. Lorsque les procédures nécessaires pour transcoder les petits nombres peuvent être abandonnées et remplacées par la récupération directe en mémoire, ceci simplifie à son tour l'écriture des grands nombres sans surcharger le système. Ainsi, faciliter le transcodage pourrait être important pour réussir en calcul mental et son automatisation pourrait contribuer au développement des capacités mathématiques des enfants.

Perspectives de recherches futures :

Les résultats rapportés dans cette thèse ainsi que les modifications que nous proposons d'apporter au modèle ADAPT concernant les aspects inter-linguistiques, pourraient fournir des pistes d'investigation pour la recherche future. Plusieurs axes de recherche pour poursuivre ce travail peuvent être investigués.

Premièrement, nous avons tenté dans cette recherche de valider les prédictions du modèle ADAPT, d'étudier notamment la genèse de sa version ADAPT_{BASIC} et de l'étendre dans une approche inter-linguistique. Il sera donc intéressant d'étendre également la version ADAPT_{ADV} dans une perspective inter-linguistique. Dans un premier pas, à la lumière de nos résultats, nous avons proposé les modifications à apporter aux règles concernant le transcodage des nombres « cent » et « mille » de la version ADAPT_{ADV} pour le système numérique verbal syrien. Toutefois, concernant les nombres centaines, vu qu'à l'âge étudié ces nombres ne rentrent pas dans l'enseignement systématique, nous en avons dicté quelques uns pour explorer les connaissances des enfants. Ainsi, une investigation plus poussée du transcodage de ces nombres en dictant plus de nombres centaines à des enfants Syriens et Allemands en premier et deuxième grade d'école primaire sera nécessaire pour pouvoir étendre également la version ADAPT_{ADV}.

Deuxièmement, il sera intéressant de soumettre individuellement à une dictée des nombres des enfants Allemands et Syriens, pour observer de près les stratégies employées pour transcoder les nombres centaines face à une telle contradiction entre le sens de l'énonciation et le sens d'écriture tout en mesurant le temps d'écriture des chiffres (*cf* la technique utilisé par Lochy *et al.*, 2002 ; Loosbroek *et al.*, 2009).

En outre, à notre connaissance, la plupart des adultes en Syrie, lorsqu'ils envisagent de transcoder un nombre entendu en tapant sur un clavier (d'ordinateur, de calculatrice, ou de téléphone, etc.), suivent une stratégie de répétition orale de l'énonciation en corrigeant l'inversion pour éviter d'inverser les chiffres du nombre entendu. Par exemple, le nombre DU « 25 » énoncé comme « cinq et vingt » sera répété comme « vingt – cinq et vingt » en privilégiant donc l'énonciation du nombre dizaine avant. Un nombre centaine tel que « 125 », énoncé « cent et cinq et vingt », sera répété comme « cent et vingt – cinq et vingt » pour garder l'ordre de production gauche droite séquentielle sans alterner. D'autres sujets pourraient également visualiser mentalement la forme digitale du nombre. Ainsi, une comparaison entre écriture à la main (où le sujet peut suivre une stratégie qui permet de diminuer le coût de traitement en mémoire) et sur un clavier d'ordinateur (où il y a une obligation d'ordre de production) pourrait être intéressante pour vérifier le coût cognitif dû au traitement de la contradiction expliquée précédemment, tout en comparant entre les deux stratégies possibles et leur impact sur l'efficacité de transcodage.

Le système numérique digital est symbolique²⁷ et il est organisé spatialement (place-value system). Dans une tâche de dictée de nombres, l'entrée est verbale phonologique alors que la sortie a un aspect visuo-spatial. Ainsi, la valeur d'un chiffre est déterminée par sa position spatiale et sans un traitement correct de la position spatiale de chaque chiffre, la valeur d'un nombre ne peut pas être déterminée. Il est probable que la MdT visuo-spatiale soit sollicitée davantage dans l'écriture des nombres dans les systèmes numériques allemand ou syrien - dans lesquels il peut y avoir une contradiction entre sens d'énonciation d'un nombre et sens général d'écriture- que dans le système français (voir aussi Zuber *et al.*, 2009). Ainsi, il serait intéressant de faire une étude sur le type de MdT (ou sa composante) impliqué ou sollicité dans une tâche de transcodage en chiffres en fonction de cette propriété. Des résultats issus d'une telle approche pourraient aider à proposer des préconisations dans les méthodes d'enseignement mieux adaptées aux capacités des enfants en début d'apprentissage. Il serait intéressant également d'analyser quel type de mémoire est lié à quel type d'erreur et ceci dans une approche inter-linguistique (par exemple une erreur d'inversion dans le système français est considérée comme lexicale alors que cette même erreur dans le système allemand ou syrien est notée comme étant de nature syntaxique). Il est possible, chez les enfants Français par exemple, que le « central executive » ainsi que la capacité de stockage phonologique

²⁷ cf. Zhang & Norman, (1995)

soient sollicités dans le transcodage en chiffres, alors que chez les Allemands et les Syriens, il est probable que ce soit le « central executive » et la mémoire visuo-spatiale.

Par ailleurs, il sera intéressant de tester le passage de l'algorithme à l'automatisation prédit par le modèle ADAPT auprès des enfants Allemands et Syriens. Ainsi, lorsque les formes digitales des nombres à deux chiffres (ceux dont le sens d'énonciation contredit le sens d'écriture) sont stockées en MLT, leur transcodage donne donc lieu à une récupération directe en mémoire. Le coût cognitif est alors moindre : la corrélation entre la performance de transcodage et les capacités mémorielles devrait diminuer avec le développement. En outre, l'automatisation de ces petits nombres devrait faciliter à son tour le transcodage des grands nombres et augmenter l'efficacité de transcodage.

Il est important pour les recherches futures vérifiant l'impact de la mémoire de travail sur le transcodage de choisir attentivement la composante de la MdT à tester, quel test de mémoire utiliser et probablement quels types d'erreurs étudier.

Pistes rééducatives :

Dans leur étude, Sullivan *et al.*, (1996) se sont basés sur les propositions du modèle de McCloskey pour construire un programme rééducatif (donc basé sur la sémantique) pour leur patient adolescent CM qui souffrait d'une dyscalculie développementale. Ce patient résolvait normalement des tâches de compréhension verbale (ce qui suggère un accès intact à la représentation sémantique) et ses difficultés étaient localisées, selon les auteurs, au niveau de la production en chiffres. Cette étude a montré une décomposition entre les composants du modèle de McCloskey mais aussi les bénéfices d'un programme de rééducation rapide sur les mécanismes syntaxiques de production en chiffres. Pour leur part, Deloche, Seron et Ferrand (1989) ont élaboré un programme de rééducation basé sur la conception asémantique du transcodage, et donc l'apprentissage de règles, chez deux patients adultes. Cette perspective asémantique a ouvert une piste de rééducation chez l'enfant également. Ferrand, Deloche et Seron (1990) ont appliqué avec succès ce même programme de rééducation sur deux enfants de 12 et 15 ans présentant d'importantes difficultés d'écriture et de lecture des numéraux verbaux écrits. L'avantage d'une telle approche asémantique procédurale est qu'elle permet une généralisation à des situations nouvelles.

A notre connaissance, aucune étude de cas en neuropsychologie – sauf celles rapportées par les auteurs du modèle ADAPT (Barrouillet *et al.*, 2004) – n'a essayé jusqu'à présent de se baser sur ce modèle qui a cependant montré sa capacité à expliquer les erreurs des patients

décrites dans certaines études de cas en neuropsychologie de l'adulte²⁸. Ainsi, il est important que les études de cas des patients en neuropsychologie se basent sur le modèle ADAPT pour interpréter les erreurs des patients et établir un programme de rééducation. En particulier, ce modèle offre la possibilité de vérifier exactement quelles sont les règles acquises avant d'en enseigner de nouvelles, ce qui est important à faire avant d'entamer tout programme rééducatif.

²⁸ Le cas de D.M. présenté par Cipolotti, Butterworth et Warrington (1994), le cas L.R. présenté par Noël et Seron (1995), et le cas C.K. présenté par Delazer et Denes (1998), les patients de ces études éprouvaient des difficultés de transcodage de la forme verbale vers la forme en chiffres.

REFERENCES

REFERENCES :

- Adams, J., & Hitch, G. (1998). Working memory and children's mental addition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 67, 21-38.
- Allport, D. A., & Funnell, E. (1981). Components of the Mental Lexicon. The Psychological Mechanisms of Language. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 295, (1077). 397- 410
- Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anderson, J. R. (1990). *The adaptive character of thought*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Anderson, J. R. (1993). *The rules of the mind*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Anderson, J. R., & Lebière, C. (1998). *Atomic components of thought*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Anderson, J. R., Reder, L. M., & Lebière, C. (1996). Working memory: Activation limitations on retrieval. *Cognitive Psychology*, 30, 221–256.
- Atkinson, J.R., Shiffrin, R.M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K.W. Spence (Eds), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, Vol. 2 (pp. 89-195). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory*. Oxford, U.K. : Oxford university press.
- Baddeley, A. D. (1990). *Human memory: Theory and practice*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Baddeley, A.D. (1986). *Working memory*. Oxford : Clarendon Press.
- Baddeley, A.D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Science*, 4, 417-423.
- Baddeley, A.D., Hitch, G.J. (1974). Working memory. In G.H. Bower (Eds), *Recent advances in learning and motivation*, Vol. 8 (pp. 647-667). New York: Academic Press.
- Barrouillet, P. & Camos, V. (2006). *La cognition mathématique chez l'enfant*. Marseille : Solal.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2001). Developmental increase in working memory span: Resource sharing or temporal decay? *Journal of Memory and Language*, 45, 1-20.
- Barrouillet, P., & Fayol, M. (1998). From algorithmic computing to direct retrieval: Evidence from number and alphabetic arithmetic in children and adults. *Memory & Cognition*, 26, 355-368.

- Barrouillet, P., & Lecas, J.F. (1999). Mental models in conditional reasoning and working memory. *Thinking & Reasoning*, 5(4), 289-302.
- Barrouillet, P., & L epine, R. (2005). Working memory and children’s use of retrieval to solve addition problem. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91, 183-204.
- Barrouillet, P., Camos, V., Morlaix, S., Suchaut, B. (2008). Progressions scolaires, m emoire de travail et origine sociale : quels liens   l’ cole  l mentaire? *Revue française de p dagogique*, 162, 5-14.
- Barrouillet, P., Camos, V., Perruchet, P., & Seron, X. (2004). ADAPT: A developmental, asemantic, and procedural model for transcoding from verbal to arabic numerals, *Psychological review*, 111, 368-394.
- Bayliss, D. M., Jarrold, C., Baddeley, A. D., Gunn, D. M., & Leigh, E. (2005). Mapping the developmental constraints on working memory span performance. *Developmental Psychology*, 41, 579-597.
- Bayliss, D. M., Jarrold, C., Gunn, D. M., & Baddeley, A. D. (2003). The complexities of complex span: Explaining individual differences in working memory in children and adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 71-92.
- Benson, D. F., & Denckla, M. B. 1969. Verbal paraphasia as a source of calculation disturbance. *Archives of Neurology*, 21, 96-102.
- Blanken, G., Dorn, M., & Sinn, H. (1997). Inversion Errors in Arabic Number Reading: Is There a Nonsemantic Route? *Brain and Cognition* 34 (3), 404-423
- Brysbaert, M., Fias, W., & No l, M.-P. (1998). The Whorfian hypothesis and numerical cognition: Is “twenty-four” processed in the same way as “four-and-twenty”? *Cognition*, 66, 51-77.
- Bull, R., & Scerif, G. (2001). Executive functioning as a predictor of children’s mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology*, 19, 273-293.
- Bull, R., Johnston, R. S., & Roy, J. A. (1999). Exploring the role of the visual–spatial sketch pad and central executive in children’s arithmetical skills: View from cognition and developmental neuropsychology. *Developmental Neuropsychology*, 15, 421-442.
- Camos, V. (2008). Low working memory capacity impedes both efficiency and learning of number transcoding in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99, 37-57

- Camos, V., & Barrouillet, P. (2008). ADAPT : Un modèle asémantique développemental et procédural du transcodage des nombres de leur forme verbale en leur forme en chiffres arabes. In R. Jouvent & G. Chapoutier (Eds.), *La cognition réparée? Perturbations et récupérations des fonctions cognitives* (pp. 197-214). Paris: Editions de la Maison des Sciences de l'Homme
- Caramazza, A., & McCloskey, M. (1987). Dissociations of calculation processes. In G. Deloche & X. Seron (Eds.), *Mathematical disabilities* (pp. 221-234). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Case, R. (1985). *Intellectual development: Birth to adulthood*. New York: Academic Press.
- Case, R. (1992). *The mind's staircase: exploring the conceptual underpinnings of children's thought and knowledge*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Case, R., Kurland, M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, 33, 386-404.
- Cipolotti, L. (1995). Multiple routes for reading words, why not numbers? Evidence from a case of arabic numeral dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 12, 313-342.
- Cipolotti, L., & Butterworth, B. (1995). Towards a multiroute model of number processing: Impaired number transcoding with preserved calculation skills. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124, 375-390.
- Cipolotti, L., & Thioux, M. (2004). Troubles du calcul et du traitement des nombres : les travaux fondateurs. Dans Pesenti, M., & Seron, X. *La cognition numérique* (pp. 23-44). Lavoisier, Paris.
- Cipolotti, L., Butterworth, B., & Denes, G. (1991). A specific deficit for numbers in a case of dense acalculia. *Brain*, 114, 2619-2637.
- Cipolotti, L., Butterworth, B., & Warrington, E. K. (1994). From "one thousand nine hundred and forty five" to 1,000,945. *Neuropsychologia*, 32, 503-509.
- Cipolotti, L., Warrington, E. K., & Butterworth, B. (1995). Selective impairment in manipulating Arabic numerals. *Cortex*, 31, 73-86.
- Cohen, L., Dehaene, S., & Verstichel, P. (1994). Number words and number non-words: A case of deep dyslexia extending to arabic numerals. *Brain*, 117, 267-279.
- Compton, B. J., & Logan, G. D. (1991). The transition from algorithm to retrieval in memory based theories of automaticity. *Memory & Cognition*, 19, 151-158.
- Comrie, B. (2005). Endangered numeral systems. In J. Wohlgemuth & T. Dirksmeyer (Eds.), *Bedrohte Vielfalt: Aspekte des Sprach(en)tods [Endangered diversity: Aspects of language death]*, 13-15. Berlin: Weißensee Verlag.

- Comrie, B. (2006). Numbers, language, and culture. Paper presented at the Jyvaskyla Summer School, Jyvaskyla, Finland. (cité par Zuber *et al.*, 2009)
- Conway, A., Jarrold, C., Kane, M., Miyake, A., & Towse, J. (Eds.). (2007). *Variation in working memory*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Cowan, N. (1995). *Attention and memory: An integrated framework*. New York: Oxford University Press.
- Cowan, N. (1999). An embedded-process model of working memory. In A.Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 62-101). Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19, 450-466.
- Dehaene, S., & Mehler, J. (1992). Cross-linguistic regularities in the frequency of number words. *Cognition*, 43, 1-29
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42.
- Delazer, M., & Denes, G. (1998). Writing arabic numerals in an agraphic patient. *Brain and Language*, 64, 257-266.
- Deloche G, Seron X, Ferrand I. (1989). Reeducation of number transcoding mechanisms: A procedural approach. In: X. Seron and G. Deloche, (Eds). *Cognitive approach in neuropsychological rehabilitation* (pp.247-271). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Deloche, G., & Seron, X. (1982a). From one to 1: An analysis of a transcoding process by means of neuropsychological data. *Cognition*, 12, 119-149.
- Deloche, G., & Seron, X. (1982b). From three to 3: A differential analysis of skills in transcoding quantities between patients with Broca's and Wenicke's aphasia. *Brain*, 105, 719-733.
- Deloche, G., & Seron, X. (1987). Numerical transcoding: A general production model. In G. Deloche & X. Seron (Eds.). *Mathematical disabilities: A cognitive neuropsychological perspective* (pp. 137-170). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- DeStefano, D., & LeFevre, J.-A. (2004). The role of working memory in mental arithmetic. *European Journal of Cognitive Psychology*, 16, 353-386.
- Droz R., (1991). Les multiples racines des nombres naturels et leurs multiples interprétations. In J. Bideau, Cl. Meljac et J. P. Fischer (Eds). *Les chemins du nombre* (pp. 285-302). Lille, Presses Universitaires de Lille.

- Durkin, K., Shire, B., Riem, R., Crowther, R.D., & Rutter, D.R. (1986). The social and linguistic context of early number word use. *British Journal of Developmental Psychology*, 4, 269-288.
- Engle, R. W., Kane, M. J., & Tuholski, S. W. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general fluid intelligence, and functions of the prefrontal cortex. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 102-134). Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Eriksen, C. W., Pollack, M. D., & Montague, W. E. (1970). Implicit speech: Mechanism in perceptual encoding? *Journal of Experimental Psychology*, 84, 502-507.
- Fayol M., Barrouillet P., Renaud A. (1996) : Mais pourquoi l'écriture des Grands- Nombres est-elle aussi difficile? *Revue de Psychologie de l'Education*, 2, 87-107.
- Fayol, M. (1990). *L'enfant et le nombre*. Neuchâtel, Paris: Delachaux & Niestlé.
- Fayol, M., (2005). Les petits Asiatiques savent-ils mieux compter ? *Cerveau et psycho*, n°9.
- Fayol, M., Camos, V, & Roussel, J.L. (2000). Acquisition et mise en œuvre de la numération par des enfants de 2 à 9 ans. In M. Pesenti et X. Seron (Eds.). *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres* (pp. 33-58). Marseille: Solal.
- Ferrand, I., Deloche, G., Seron, X. (1990). Les nombres en chiffres et en mots : rééducations expérimentales. [The numbers in orthographic forms: experimental rehabilitation]. *Rééducation orthophonique*, 28 (163), 341-357.
- Fuson, K. & Kwon, Y. (1991). Systèmes de mots-nombres et autres outils culturels. Dans J. Bideaud, C. Meljac & Fischer, J.C. (Eds.), *Les chemins du nombre* (pp. 351-376). Lille: Presses universitaires de Lille.
- Fuson, K. C., Richards, J., & Briars, D. J. (1982). The acquisition and elaboration of the number word sequence. In C. J. Brainerd (Ed.), *Children's logical and mathematical cognition: Progress in cognitive development research* (pp. 33-92). New York: Springer-Verlag.
- Fuson, K.C. (1988). *Children's counting and concepts of number*. New York: Springer-Verlag.
- Gardner, H., Strub, R., Albert, M L. (1975). A unimodal deficit in operational thinking. *Brain and Language* 2(3), 333-344.

- Gathercole, S. E., & Pickering, S. J. (2000). Working memory deficits in children with low achievements in the national curriculum at 7 years of age. *British Journal of Educational Psychology*, 70, 177-194.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C., & Stegmann, Z. (2004). Working memory skills and educational attainment: Evidence from national curriculum assessments at 7 and 14 years. *Applied cognitive Psychology*, 18, 1-16.
- Gavens, N., & Barrouillet, P. (2004). Delays of retention, processing efficiency, and attentional resources in working memory span development. *Journal of Memory and Language*, 51, 644-657.
- Gavens, N., & Camos, V. (2006). La mémoire de travail : une place centrale dans les apprentissages scolaires fondamentaux. In E. Gentaz & P. Dessus (Eds.), *Apprentissages et enseignement : Sciences cognitives et éducation* (pp. 91-106). Paris : Dunod.
- Geary, D. C. (1990). A componential analysis of an early learning deficit in mathematics. *Journal of Experimental Child Psychology*, 49, 363-383.
- Geary, D. C. (1993). Mathematical disabilities: Cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin*, 114, 345-362.
- Geary, D. C. (1994). *Children's mathematical development: Research and practical applications*. Washington, DC: American Psychological Association.
- Geary, D. C., Brown, S. C., & Samaranayake, V. A. (1991). Cognitive addition: A short longitudinal study of strategy choice and speed-of-processing differences in normal and mathematically disabled children. *Developmental Psychology*, 27, 787-797.
- Geary, D. C., Hamson, C. O., & Hoard, M. K. (2000). Numerical and arithmetical cognition: A longitudinal study of process and concept deficits in children with learning disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77, 236-263.
- Geary, D. C., Hoard, M. K., & Hamson, C. O. (1999). Numerical and arithmetical cognition: Patterns of functions and deficits in children at risk for a mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74, 213-239.
- Geary, D.C., Salthouse, T.A., Chen, G. & Fan, L. (1996). Are East Asian versus American differences in arithmetical ability a recent phenomenon? *Developmental Psychology*, 32, 254-262.
- Gelman, R., & Gallistel, C.R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge, MA: Harvard University press.

- Ginsburg, H. P., & Russell, R. L. (1981). Social class and racial influences on early mathematical thinking. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 46 (6, Serial No. 193).
- Halford, G. S. (1993). *Children's understanding*. Hillsdale, CA: Lawrence Erlbaum.
- Haspelmath, M., Dryer, M.S., Gil, D., & Comrie, B. (2005). *The World Atlas of Language Structures*. Oxford: Oxford University Press.
- Hitch, G. J., & McAuley, E. (1991). Working memory in children with specific arithmetical learning difficulties. *British Journal of Psychology*, 82, 375-386.
- Hughes, M. (1986). *Children and number: Difficulties in learning*. New York: Basic Blackwell.
- Hurford, J.R. (1987). *Language and number. The emergence of a cognitive system*. New York: Blackwell.
- Ifrah, G. (1981). *Histoire universelle des chiffres. Lorsque les nombres racontent les hommes*. Paris : Seghers.
- Ifrah, G. (1994). *Histoire universelle des chiffres. L'intelligence des hommes racontée par les nombres et le calcul*. 2 vol., Ed. Robert Lafont, Paris.
- Jarlegan, A., Fayol, M. & Barrouillet, P. (1996). De soixante douze à 72, et inversement: Une étude du transcodage chez les enfants de 7 ans. *Revue de Psychologie de l'Education*, 1, 109-131.
- Jarrold, C., & Towse, J. N. (2006). Individual differences in working memory. *Neuroscience*, 139, 39-50.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working-memory capacity and the control of attention: The contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 47-70.
- Kaufman, A. S. & Kaufman, N. L. (1993). *K-ABC, Batterie pour l'évaluation psychologique de l'enfant*. Paris : Éditions du centre de psychologie appliquée.
- Kaufmann, L., & Nuerk, H. C. (2005). Numerical development: current issues and future perspectives. *Psychology Science*, 47(1), 142-170
- Klapp, S. (1971). Implicit speech inferred from response latencies in same-different decisions. *Journal of Experimental Psychology*, 91, 262-267.
- Lépine, R., Barrouillet, P., & Camos, V. (2005). What makes the working memory spans so predictive of highlevel cognition? *Psychonomic Bulletin and Review*, 12, 165-170.
- Lochy, A., Delazer, M., & Seron, X. (2003). Influence of language in the early acquisition of numbers writing: A comparison of French and German. Paper presented at the

Third Aachen–Gent Brain and Number Workshop, Aachen, Germany. Cité par Zuber *et al.*, (2009).

- Lochy, A., Delazer, M., Domahs, F., Zoppoth, S., & Seron, X. (unpublished manuscript, cité par Zuber *et al.*, 2009 et par Kaufman & Nuerkk, 2005). The acquisition of Arabic notation in children: A cross-linguistic study of French versus German.
- Lochy, A., Domahs, F., Bartha, L., & Delazer, M. (2004). Specific order impairment in Arabic number writing: A case study. *Cognitive Neuropsychology*, *21*, 555-575.
- Lochy, A., Pillon, A., Zesiger, P., & Seron X (2002). Verbal structure of numerals and digits handwriting: New evidence from kinematics. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *55A (1)*, 263-288
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, *95*, 492-527.
- Logan, G. D., & Klapp, S. T. (1991). Automatizing alphabet arithmetic: I. Is extended practice necessary to produce automaticity? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *17*, 179-195.
- Loosbroek, E.V., Dirx, G., Hulstijn, W., & Janssen, F. (2009). When the mental number line involves a delay: The writing of numbers by children of different arithmetical abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, *102 (1)*, 26-39.
- Lovett, M. C., Reder, L. M., & Lebière, C. (1999). Modeling working memory in a unified architecture: An ACTR perspective. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp.135-182). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Macaruso, P., McCloskey, M.; & Aliminosa, D. (1993). The functional architecture of the cognitive numerical-processing system: evidence from a patient with multiple impairments. *Cognitive neuropsychology*, *10 (4)*, 341-376
- McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing: Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, *44*, 107-157.
- McCloskey, M., Aliminosa, D., & Sokol, S. M. (1991). Facts, rules, and procedures in normal calculation: Evidence from multiple single-patient studies of impaired arithmetic fact retrieval. *Brain and Cognition*, *17*, 154-203.
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number-processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, *4*, 171-196.

- McCloskey, M., Sokol, S., & Goodman, R. (1986). Cognitive processes in verbal number production: Inferences from the performance of brain-damaged subjects. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115, 307-330.
- McKenzie, B., Bull, R., & Gray, C. (2003). The effects of phonological and visual-spatial interference on children's arithmetical performance. *Educational and Child Psychology*, 20, 93-108.
- McLean, J. F., & Hitch, G. J. (1999). Working memory impairments in children with specific arithmetic learning difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74, 240-260.
- Miller, K.F., Smith, C.M., Zhu, J. & Zhang, H. (1995). Developmental origins of cross-national differences in mathematical competences. *Psychological Science*, 6, 56-60.
- Miura, I. T., Okamoto, Y., Kim, C. C., Steere, M., & Fayol, M. (1993). First graders' cognitive representation of numbers and understanding of place value: Cross-national comparison France, Japan, Korea, Sweden, and the United States. *Journal of Educational Psychology*, 85, 24-30.
- Miura, I.T., Okamoto, Y., Kim, C.C., Chang, C.M., Steere, M. et Fayol, M. (1994). Comparisons of children's cognitive representation of number: China, France, Japan, Korean, Sweden and the United States. *International Journal of Behavioral Development*, 17 (3), 401- 411.
- Morton, J., (1970). Word recognition. In J. Morton et J.D. Marshall, *Psycholinguistics : Structure and Processes* (2), pp.107-156. Cambridge (Mass.), MIT Press.
- Noël, M – P., Seron, X., & Trovarelli, F. (2004). Working memory as a prédicteur of addition skills and addition strategies in children. *Current Psychology of Cognition*, 22, 3-25.
- Noël, M.P. (2005). Le transcodage chez l'enfant. Dans Van Hout, A., Meljac, C., & Ficher, J.P. *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant* (pp.111-122). Paris : Masson, 2ème Edition.
- Noël, M.-P., & Seron, X. (1995). Lexicalization errors in writing Arabic numerals: A single case study. *Brain and Cognition*, 29, 151-179.
- Noël, M.-P., & Seron, X. (1997). On the existence of intermediate representations in numerical processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23, 697-720.

- Noël, M.-P., (1994). *Transcoder et calculer : une approche cognitive*. Thèse de doctorat à l'Université Catholique de Louvain, Belgique.
- Noël, M.-P., & Turconi, E. (1999). Assessing number transcoding in children. *European Review of Applied Psychology*, 49, 295-302.
- Pascual-Leone, J. (1988). Organismic processes for neo-Piagetian theories: A dialectical causal account of cognitive development. In A. Demetriou (Ed), *The neo-Piagetian theories of cognitive development, Toward an integration*, (pp.25-64). North Holland, Elsevier.
- Perret, J.F., (1985). *Comprendre l'écriture des nombres*. Berne: Peter Lang, Collection exploration, Switzerland. (Edition commerciale de la thèse de doctorat).
- Perruchet, P., & Vinter, A. (1998). PARSER: A model of word segmentation. *Journal of Memory and Language*, 39, 246-263.
- Power, R. J. D., & Dal Martello, M. F. (1997). From 834 to eighty thirty four: The reading of arabic numerals by seven-year-old children. *Mathematical Cognition*, 3, 63-85.
- Power, R.J.D. & Dal Martello, M.F. (1990). The dictation of Italian numerals. *Language and Cognitive processes*, 5, 237-254.
- Power, R.J.D., & Longuet-Higgins, J.C. (1978). Learning to count : A computational model of language acquisition. *Proceedings of the Royal Society of London*, B200, 391-417.
- Proios, H., Weniger, D., & Willmes, K. (2002). Number representation deficit: a bilingual case of failure to access written verbal numeral representations. *Neuropsychologia*, 40,(13), 2341-2349.
- Resnick, L.B. (1983). A developmental theory of nombre understanding. In H.P.Ginsburg (Ed.), *The developement of Mathematical thinking*. New York : Academic press.
- Saxton, M., & Towse, J. N. (1998). Linguistic relativity: The case of place value in multidigit numbers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 69, 66-79.
- Semenza, C., Borgo, F., & Guerrini, C. (1998). « Syntactic » processing of complex numbers: Neuropsychological study. *Brain and Cognition*, 37, 150-152.
- Seron, X., & Fayol, M. (1994). Number transcoding in children: a functional analysis. *British Journal of psychology*, 12, 281-300.
- Seron, X., & Noël, M.-P. (1995). Transcoding from the arabic code to the verbal one and vice versa : how many routes ? *Mathematical cognition*, 1, 215-243.

- Seron, X., Deloche, G. & Noël, M.P. (1991). Un transcodage des nombres chez l'enfant: La production des chiffres sous dictée. Dans J. Bideaud, C. Meljac & J.P. Fisher (Eds.), *Les chemins du nombre* (pp. 303-328). Presse universitaire de Lille, France. Traduction anglaise : pathways to numbers. Lawrence Erlbaum.
- Siegel, L.S., & Ryan, E.B. (1989). The development of working memory in normally achieving and subtypes of learning disabled children. *Child development*, 60, 973-980.
- Siegler, R. S. (1996). *Emerging minds: The process of change in children's thinking*. Oxford, England: Oxford University Press.
- Siegler, R. S., & Robinson, M. (1982). The development of numerical understanding. In H. W. Reese & L. P. Lipsitt (Eds.), *Advances in child development and behaviour*; 16, 241-312. New York: Academic Press.
- Siegler, R. S., & Shrager, J. (1984). Strategy choices in addition and subtraction: How do children know what to do? In C. Sophian (Ed.), *Origins of cognitive skills* (pp. 229-293). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Sinclair A., Mello D. & Siegrist F., (1988). La notation numérique chez l'enfant. Dans H. Sinclair (Ed.), *La production de la notation chez le jeune enfant*, Paris, PUF.
- Sinclair, A & Sinclair, H. (1984). Preschool children's interpretation of written numbers. *Human learning*, 3, 173-184.
- Singer, H. D., & Low, A. A. (1933). Acalculia (Henschen): A clinical study. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 29, 476-498.
- Sokol, S. M., McCloskey, M., Cohen, N. J., & Aliminoso, D. (1991). Cognitive representations and processes in arithmetic: Inferences from the performance of brain damaged patients. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 17, 355-376.
- Sokol, S., & McCloskey, M. (1988). Levels of representation in verbal number production. *Applied Psycholinguistics*, 9, 267-281.
- Sokol, S.M., Macaruso, P. & Gollan, T.H. (1994). Developmental dyscalculia and cognitive neuropsychology. *Developmental neuropsychology*, 10, 413-441.
- Stevenson, H.W., Lee, S.Y. & Stigler, J.W. (1986). Mathematics achievement of Chinese, Japanese and American children. *Science*, 231 (4739), 693-699.
- Stevenson, H.W., Stigler, J.W., Lee, S.Y., Lucker, G.W., Kitamura, S., & Hsu, C.C. (1985). Cognitive performance and academic achievement of Japanese, Chinese and American children. *Child Development*, 56, 718-734.

- Sullivan, K. S., Macaruso, P., & Sokol, S. M. (1996). Remediation of Arabic numeral processing in a case of developmental dyscalculia. *Neuropsychological Rehabilitation, 6*, 27-53.
- Temple, C.M. (1989). Digit dyslexia: A category-specific disorder in developmental dyscalculia. *Cognitive neuropsychology, 6*, 93-116.
- Wechsler, D. (1991). *Wechsler Intelligence Scale for Children*. Third Edition manual. New York, NY: The psychological Corporation.
- Zhang, J., & Norman, D. A. (1995). A representational analysis of numeration systems. *Cognition, 57*, 271-295.
- Zuber, J., Pixner, S., Moeller, K., & Nuerk, H.-C. (2009). On the language specificity of basic number processing: Transcoding in a language with inversion and its relation to working memory capacity. *Journal of Experimental Child Psychology, 102*, 60-77.

ANNEXES

ANNEXE 1. La grille de réponse de l'enfant

Fille.	Garçon.	Né(e) le.../.../...	Le.../.../...
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			

ANNEXE 2 : les deux ordres de nombres dictés (études exploratoire et comparative, enfants de CP)

ORDRE 1	nombres
1	52
2	68
3	19
4	21
5	78
6	80
7	2
8	91
9	113
10	5
11	30
12	27
13	11
14	9
15	60
16	97
17	4
18	13
19	100
20	17
21	140
22	23
23	10
24	77
25	206
26	14
27	103
28	200
29	73
30	25
31	33
32	50
33	18
34	1000
35	15
36	93
37	70
38	22
39	89
40	72
41	40
42	12
43	79
44	220
45	7
46	98
47	20
48	95
49	47
50	90

ORDRE 2	nombres
1	72
2	40
3	93
4	206
5	100
6	68
7	21
8	95
9	10
10	73
11	15
12	1000
13	22
14	89
15	14
16	77
17	90
18	12
19	27
20	11
21	140
22	33
23	70
24	18
25	79
26	220
27	19
28	80
29	17
30	25
31	98
32	5
33	47
34	60
35	23
36	7
37	13
38	97
39	2
40	30
41	4
42	103
43	50
44	113
45	20
46	91
47	200
48	9
49	52
50	78

ANNEXE 3. Les 50 nombres dictés et les règles de transcodage d'ADAPT_{BASIC}

	nombre	règle	nombre règle
unités (U)	2	Pa / Pe	2
	4	Pa / Pe	2
	5	Pa / Pe	2
	7	Pa / Pe	2
particuliers (P)	9	Pa / Pe	2
	11	Pd / Pe	2
	12	Pd / Pe	2
	13	Pd / Pe	2
dizaines simples (Ds)	14	Pd / Pe	2
	15	Pd / Pe	2
	10	Pb / Pe'	2
	20	Pb / Pe'	2
dix- unité	30	Pb / Pe'	2
	40	Pb / Pe'	2
	50	Pb / Pe'	2
	60	Pb / Pe'	2
DU simples (DUs)	17	Pb / Pa' / Pe	3
	18	Pb / Pa' / Pe	3
	19	Pb / Pa' / Pe	3
Dizaines complexes (Dc)	21	Pb / Pa' / Pe	3
	22	Pb / Pa' / Pe	3
	23	Pb / Pa' / Pe	3
	25	Pb / Pa' / Pe	3
	27	Pb / Pa' / Pe	3
	33	Pb / Pa' / Pe	3
	47	Pb / Pa' / Pe	3
	52	Pb / Pa' / Pe	3
Dizaines unités complexes (Duc)	68	Pb / Pa' / Pe	3
	70	Pb / Pc / Pe'	3
	80	Pb / Pe'	2
centaines	90	Pb / Pc / Pe'	3
	72	Pb / Pd' / Pe	3
	73	Pb / Pd' / Pe	3
	89	Pb / Pa' / Pe	3
	91	Pb / Pd' / Pe	3
	93	Pb / Pd' / Pe	3
	95	Pb / Pd' / Pe	3
	77	Pb / Pc / Pa' / Pe	4
	78	Pb / Pc / Pa' / Pe	4
	79	Pb / Pc / Pa' / Pe	4
97	Pb / Pc / Pa' / Pe	4	
98	Pb / Pc / Pa' / Pe	4	
cent mille	103	P1b / P2a / P4b / P4c	4
	113	P1e / P2a / P4c	3
	140	P1d / P2a / P4c	3
	200	P1b / P2b / P4b	3
	206	P1a / P1a / P2b / P4b / P4c	5
	220	P1a / P1c / P2b / P4c	4
cent mille	100	P2a / P4b	2
	1000	P3a / P4b	2

Les procédures sont regroupés selon les primitives lexicales déclenchant: a = unités, b = décades, c = dix, d = teens (en français les particuliers), et e = la fin de la chaîne de règles (end). Exemple: la procédure Pa: condition: input = unité → action = trouver PV (valeur positionnelle de la primitive lexicale dans sa classe, par exemple la PV pour 13 est 3) en LTM (mémoire à long-terme), condition: case = non → action = mettre PV en chaîne en cours de construction en mémoire de travail, arrêter.

ANNEXE 4. Nombres dictés dans chaque passation à chaque groupe d'âge et les règles d'ADAPT_{BASIC}

MATERNELLE (GS)

	Seance 1	Seance 2	Séance 3	Règles ADAPT _{BASIC}	nbre règles
Unités fixes	5	5	5	Pa / Pe	2
Unités fixes	2	2	2	Pa / Pe	2
Unités fixes	9	9	9	Pa / Pe	2
Unités changeant	4	1	3	Pa / Pe	2
Unités changeant	7	6	8	Pa / Pe	2
Dizaines fixes	10	10	10	Pb / Pe'	2
Dizaines fixes	20	20	20	Pb / Pe'	2
Particuliers fixes	11	11	11	Pd / Pe	2
Particuliers fixes	14	14	14	Pd / Pe	2
Particuliers fixes	13	13	13	Pd / Pe	2
Particuliers changeant	12	12	15	Pd / Pe	2
Particuliers changeant	15	16	16	Pd / Pe	2
Dix-unités fixes	17	17	17	Pb / Pa' / Pe	3
Dix-unités fixes	18	18	18	Pb / Pa' / Pe	3
Dix-unités fixes	19	19	19	Pb / Pa' / Pe	3
Dizaines unite simples fixes	25	25	25	Pb / Pa' / Pe	3
Dizaines unite simples fixes	27	27	27	Pb / Pa' / Pe	3
Dizaines unite simples fixes	22	22	22	Pb / Pa' / Pe	3
Dizaines unite simples changeant	21	26	29	Pb / Pa' / Pe	3
Dizaines unite simples changeant	23	28	24	Pb / Pa' / Pe	3

CP

	Seance 1	Seance 2	Séance 3	Règles ADAPT _{BASIC}	nbre règles
Dizaines simple fixes	30	30	30	Pb / Pe'	2
Dizaines simple fixes	40	40	40	Pb / Pe'	2
Dizaines simple fixes	50	50	50	Pb / Pe'	2
Dizaines simple fixes	60	60	60	Pb / Pe'	2
DUs fixes	33	33	33	Pb / Pa' / Pe	3
DUs fixes	47	47	47	Pb / Pa' / Pe	3
DUs fixes	68	68	68	Pb / Pa' / Pe	3
DUs changeant	52	82	55	Pb / Pa' / Pe	3
DUc et DUs changeant	89	37	42	Pb / Pa' / Pe	3
Dizaines complexe fixes	80	80	80	Pb / Pe	2
Dizaines complexe fixes	70	70	70	Pb / Pc / Pe'	3
Dizaines complexe fixes	90	90	90	Pb / Pc / Pe'	3
DUc fixes	73	73	73	Pb / Pd' / Pe	3
DUc fixes	95	95	95	Pb / Pd' / Pe	3
DUc fixes	91	91	91	Pb / Pd' / Pe	3
DUc changeant	93	75	94	Pb / Pd' / Pe	3
DUc changeant	72	92	74	Pb / Pd' / Pe	3
DUc fixes	78	78	78	Pb / Pc / Pa' / Pe	4
DUc fixes	97	97	97	Pb / Pc / Pa' / Pe	4
DUc fixes	79	79	79	Pb / Pc / Pa' / Pe	4
DUc changeant	77	99	77	Pb / Pc / Pa' / Pe	4
DUc changeant	98	98	99	Pb / Pc / Pa' / Pe	4

ANNEXE 5. Pourcentage d'erreurs et de non-réponse pour chaque sujet à chaque passation (P1, P2, P3) chez les enfants de GS

	P1	P2	P3	P1		P2		P3	
	% erreur avec N	% erreur avec N	% erreur avec N	% erreur sans N	% N	% erreur sans N	% N	% erreur sans N	% N
sujet 1	90	25	30	45	45	25	0	30	0
sujet 2	45	10	0	40	5	5	5	0	0
sujet 3	0	5	0	0	0	5	0	0	0
sujet 4	10	5	0	0	10	0	5	0	0
sujet 5	100	75	60	0	100	40	35	20	40
sujet 6	95	90	85	45	50	0	90	20	65
sujet 7	75	55	45	0	75	5	50	0	45
sujet 8	30	15	0	15	15	5	10	0	0
sujet 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sujet 10	50	10	30	15	35	5	5	30	0
sujet 11	20	5	0	10	10	5	0	0	0
sujet 12	55	35	5	5	50	5	30	5	0
sujet 13	65	5	0	5	60	5	0	0	0
sujet 14	25	0	0	0	25	0	0	0	0
sujet 15	100	95	70	0	100	0	95	0	70
sujet 16	100	75	65	5	95	15	60	5	60
sujet 17	100	90	100	0	100	40	50	5	95
sujet 18	80	80	65	5	75	5	75	10	55
sujet 19	75	50	10	15	60	5	45	0	10
sujet 20	80	55	25	10	70	5	50	10	15
sujet 21	20	20	10	5	15	5	15	0	10
sujet 22	5	10	0	0	5	0	10	0	0
sujet 23	95	80	85	25	70	0	80	0	85
sujet 24	80	60	60	15	65	20	40	25	35
sujet 25	100	25	10	0	100	10	15	5	5
sujet 26	85	75	65	5	80	5	70	5	60
sujet 27	0	35	0	0	0	10	25	0	0
sujet 28	0	5	0	0	0	5	0	0	0
sujet 29	100	60	50	0	100	0	60	45	5
sujet 30	85	65	75	10	75	15	50	10	65
sujet 31	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sujet 32	70	60	70	5	65	30	30	15	55
sujet 33	80	95	90	15	65	0	95	5	85
sujet 34	40	60	60	40	0	60	0	60	0
sujet 35	55	45	25	30	25	30	15	10	15
sujet 36	75	60	25	25	50	35	25	15	10
sujet 37	45	40	50	25	20	35	5	20	30
sujet 38	0	10	0	0	0	10	0	0	0
sujet 39	50	50	60	10	40	10	40	15	45
sujet 40	35	30	30	35	0	30	0	30	0
sujet 41	5	0	5	0	5	0	0	5	0
sujet 42	30	60	40	30	0	55	5	40	0
sujet 43	60	65	65	20	40	40	25	40	25
sujet 44	20	0	0	20	0	0	0	0	0
moyen	53	41	33	12	41	13	28	11	22
écart-type	35	31	32	14	36	16	30	15	29

N : Non-réponse

ANNEXE 6. Pourcentage d'erreurs et de non-réponse pour chaque sujet à chaque passation (P1, P2, P3) chez les enfants de CP

	P1	P2	P3	P1		P2		P3	
	% erreur avec N	% erreur avec N	% erreur avec N	% erreur sans N	% N	% erreur sans N	% N	% erreur sans N	% N
sujet 1	83	67	50	10	74	24	43	33	17
sujet 2	33	5	2	33	0	5	0	2	0
sujet 3	33	0	0	2	31	0	0	0	0
sujet 4	2	0	0	0	2	0	0	0	0
sujet 5	0	2	2	0	0	2	0	2	0
sujet 6	29	26	0	29	0	26	0	0	0
sujet 7	36	26	17	7	29	14	12	5	12
sujet 8	43	24	0	43	0	14	10	0	0
sujet 9	43	38	26	0	43	2	36	0	26
sujet 10	36	2	0	33	2	2	0	0	0
sujet 11	50	31	5	50	0	31	0	5	0
sujet 12	36	2	0	21	14	2	0	0	0
sujet 13	38	31	21	38	0	31	0	21	0
sujet 14	33	5	0	33	0	5	0	0	0
sujet 15	33	12	0	33	0	10	2	0	0
sujet 16	74	67	55	48	26	38	29	50	5
sujet 17	33	31	0	33	0	24	7	0	0
sujet 18	48	29	5	26	21	29	0	0	5
sujet 19	33	19	14	33	0	10	10	5	10
sujet 20	33	45	12	33	0	45	0	12	0
sujet 21	29	2	7	29	0	2	0	7	0
sujet 22	48	43	38	36	12	17	26	24	14
sujet 23	71	33	36	21	50	26	7	17	19
sujet 24	40	36	31	10	31	19	17	5	26
sujet 25	19	5	12	17	2	5	0	12	0
sujet 26	36	17	19	17	19	14	2	17	2
sujet 27	48	36	14	5	43	5	31	14	0
sujet 28	40	24	24	17	24	7	17	5	19
sujet 29	52	40	36	7	45	5	36	5	31
sujet 30	62	36	5	21	40	29	7	5	0
sujet 31	26	5	5	17	10	2	2	2	2
sujet 32	33	2	0	17	17	2	0	0	0
sujet 33	52	33	29	26	26	17	17	5	24
sujet 34	33	0	0	0	33	0	0	0	0
sujet 35	69	43	36	36	33	5	38	5	31
sujet 36	19	17	5	19	0	17	0	5	0
sujet 37	50	48	38	17	33	10	38	0	38
sujet 38	71	45	45	21	50	10	36	7	38
sujet 39	33	33	31	2	31	0	33	0	31
sujet 40	67	40	33	19	48	38	2	33	0
moyen	41	25	16	21	20	14	11	8	9
écart-type	18	18	17	14	20	12	15	11	13

N : Non-réponse

ANNEXE 7. Nombres dictés et règles de transcodage d'ADAPT

	Nombres	Règles	Nombre de règles	
Unités (U)	2	Pa / Pe	2	
	4	Pa / Pe	2	
	5	Pa / Pe	2	
	7	Pa / Pe	2	
Particuliers (P)	9	Pa / Pe	2	
	11	Pd / Pe	2	
	12	Pd / Pe	2	
	13	Pd / Pe	2	
Dizaine simple (Ds)	14	Pd / Pe	2	
	15	Pd / Pe	2	
	10	Pb / Pe'	2	
	20	Pb / Pe'	2	
Dizaine simple (Ds)	30	Pb / Pe'	2	
	40	Pb / Pe'	2	
	50	Pb / Pe'	2	
	60	Pb / Pe'	2	
	Dizaine Unité simple DUs	17	Pb / Pa' / Pe	3
		18	Pb / Pa' / Pe	3
19		Pb / Pa' / Pe	3	
21		Pb / Pa' / Pe	3	
22		Pb / Pa' / Pe	3	
23		Pb / Pa' / Pe	3	
25		Pb / Pa' / Pe	3	
27		Pb / Pa' / Pe	3	
33		Pb / Pa' / Pe	3	
47		Pb / Pa' / Pe	3	
Dizaine complexe Dc	52	Pb / Pa' / Pe	3	
	68	Pb / Pa' / Pe	3	
	70	Pb / Pc / Pe'	3	
	80	Pb / Pe'	2	
Dizaine Unité complexe DUC	90	Pb / Pc / Pe'	3	
	72	Pb / Pd' / Pe	3	
	73	Pb / Pd' / Pe	3	
	89	Pb / Pd' / Pe	3	
	91	Pb / Pd' / Pe	3	
	93	Pb / Pd' / Pe	3	
	95	Pb / Pd' / Pe	3	
	77	Pb / Pc / Pa' / Pe	4	
	78	Pb / Pc / Pa' / Pe	4	
	79	Pb / Pc / Pa' / Pe	4	
Cent	97	Pb / Pc / Pa' / Pe	4	
	98	Pb / Pc / Pa' / Pe	4	
Centaines	100	P2a / P4b	2	
	100	P2a / P4b	2	
	105	P1b / P2a / P4b / P4c	4	
	108	P1b / P2a / P4b / P4c	4	
	112	P1e / P2a / P4c	3	
	116	P1e / P2a / P4c	3	
	122	p1b / P1c / P2a / P4c	5	
	150	P1d / P2a / P4c	3	
	160	P1d / P2a / P4c	4	
	164	p1b / P1c / P2a / P4c	4	
	230	P1a / P1c / P2b / P4c	4	
	303	P1a / P1a / P2b / P4b / P4c	5	
	400	P1a / P2b / P4b	3	
	420	P1a / P1c / P2b / P4c	4	
	613	P1a / P1e / P2b / P4c	4	
	632	P1a / P1b / P1c / P2b / P4c	5	
705	P1a / P1a / P2b / P4b / P4c	5		
715	P1a / P1e / P2b / P4c	4		
768	P1a / P1b / P1c / P2b / P4c	5		
800	P1a / P2b / P4b	3		
Mille	1000	P3a / P4b	2	
	1000	P3a / P4b	2	

ANNEXE 8. Empan de chiffres (sous test de la WISC III)

➤ Chiffres en ordre direct

Consigne : « Je vais te dire quelques chiffres. Ecoute-les attentivement et quand j'aurai fini, tu les répéteras exactement comme moi. Par exemple, si je te dis 8-2, qu'est-ce que tu me dis ? »

- si le sujet répond correctement (8-2) : « C'est bien »
- si le sujet échoue à l'item d'exemple : « Non tu dois dire 8-2. J'ai dit 8-2, donc pour les répéter, tu dois dire 8-2. Maintenant essaie avec ces chiffres. Rappelle-toi que tu dois les répéter exactement comme moi : 5-6 »

Longueur	Essai 1	Essai 2
2	2-9	4-6
3	3-8-6	6-1-2
4	3-4-1-7	6-1-5-8
5	8-4-2-3-9	5-2-1-8-6
6	3-8-9-1-7-4	7-9-6-4-8-3
7	5-1-7-4-2-3-8	9-8-5-2-1-6-3
8	1-6-4-5-9-7-6-3	2-9-7-6-3-1-5-4
9	5-3-8-7-1-2-4-6-9	4-2-6-9-1-7-8-3-5

➤ Chiffres en ordre inverse

Consigne : « Maintenant, je vais encore te dire des chiffres, mais cette fois, quand j'aurai fini, tu les répéteras à l'envers. Par exemple, si je te dis 8-2, que dois-tu répéter ? »

- si le sujet répond correctement (2-8) : « C'est bien »
- si le sujet échoue à l'item d'exemple : « Non tu dois dire 2-8. J'ai dit 8-2, aussi pour les répéter à l'envers, tu dois dire 2-8. Maintenant essaie avec ces chiffres. Rappelle-toi que tu dois les répéter à l'envers : 5-6 »

Longueur	Essai 1	Essai 2
2	2-5	6-3
3	5-7-4	2-5-9
4	7-2-9-6	8-4-9-3
5	4-1-3-5-7	9-7-8-5-2
6	1-6-5-2-9-8	3-6-7-1-9-4
7	8-5-9-2-3-4-2	4-5-7-9-2-8-1
8	6-9-1-6-3-2-5-8	3-1-7-9-5-4-8-2

ANNEXE 9. Listening Span

Consigne « Je vais te lire des phrases, et à la fin, il manque un mot ; tu dois deviner le mot qui manque. Mais tu dois te souvenir du mot, parce que quand je te le demanderai, il faudra que tu me rappelles les mots. Tu as compris ? »

- Entraînement 1 (avec aide) :
1/ En automne, les arbres perdent leurs (feuilles)
2/ Le pain est vendu dans une (boulangerie)
RAPPEL : feuilles, boulangerie
- Entraînement 2 (sans aide) : 1/ Une pomme est rouge, une banane est (jaune)
2/ La maîtresse écrit avec une craie sur le ...
(tableau)

RAPPEL : jaune, tableau

TEST

Série de 2 phrases :

- 1/ A la piscine, on apprend à (nager)
 - 2/ On mange de la soupe avec une (cuillère)
-
- 1/ On se lave les mains avec de l'eau et du (savon)
 - 2/ Le dimanche, les magasins sont (fermés)
-
- 1/ Il y a des nuages dehors, il va bientôt (pleuvoir)
 - 2/ Quand on voit mal, il faut porter des (lunettes)

Série de 3 phrases :

- 1/ Le jaune est une couleur claire, le marron est une couleur (foncée)
 - 2/ On va à la pêche pour attraper des (poissons)
 - 3/ Quand la chambre est en désordre, il faut la (ranger)
-
- 1/ La poule pond des (œufs)
 - 2/ Pour couper la viande, on se sert d'un (couteau)
 - 3/ Un homme c'est grand, un enfant c'est (petit)
-
- 1/ Quand je sors du bain, je m'essuie avec une (serviette)
 - 2/ Pour se faire couper les cheveux, on va chez le (coiffeur)
 - 3/ Un stylo c'est pour écrire, un pinceau c'est pour (peindre)

Séries de 4 phrases :

- 1/ Une fois arrêté, le voleur est mis en (prison)
 - 2/ Le chat miaule, le chien (aboie)
 - 3/ Au tennis, les joueurs envoient la balle avec une (raquette)
 - 4/ On jette les ordures et les vieux papiers dans une (poubelle)
-
- 1/ Quand on veut sentir bon, on se met du (parfum)
 - 2/ Pour enfoncer un clou, je me sers du (marteau)
 - 3/ Chaque matin, le courrier est distribué par le (facteur)
 - 4/ Les voitures roulent sur la route, les piétons marchent sur le (trottoir)

- 1/ A Noël, on accroche les boules dans le (sapin)
- 2/ Sur mon gâteau d'anniversaire, j'ai soufflé toutes les (bougies)
- 3/ L'enfant a de la fièvre, il ne va pas à l'école car il est (malade)
- 4/ J'ai découpé du papier avec des (ciseaux)

Séries de 5 phrases :

- 1/ La nuit je dors dans mon (lit)
- 2/ Quand on joue au foot, on tape dans un (ballon)
- 3/ Dans la bibliothèque, il y a beaucoup de (livres)
- 4/ On regarde les dessins animés à la (télévision)
- 5/ Sur la route, on roule avec une (voiture)

- 1/ J'ai mis mon mouchoir dans ma (poche)
- 2/ Quand il fait froid, autour du cou on met une écharpe et aux mains des (gants)
- 3/ Tous les matins au petit déjeuner, je bois un bol de (chocolat)
- 4/ Sur mon visage, il y a mes yeux, ma bouche et mon (nez)
- 5/ Pour arroser une fleur ou une plante, je lui donne de l' (eau)

- 1/ La mer c'est bleu, l'herbe c'est (vert)
- 2/ Quand il fait chaud dans la maison, j'ouvre la (fenêtre)
- 3/ La pomme de terre c'est un légume, la fraise c'est un (fruit)
- 4/ La nuit on voit la lune, et le jour on voit le (soleil)
- 5/ Quand il y a du feu, j'appelle les (pompiers)

Série de 6 phrases :

- 1/ Quand il pleut dehors, avant de rentrer dans la maison je m'essuie les pieds sur un ... (tapis)
- 2/ Pour dessiner la tête d'un bonhomme, je fais ni un carré, ni un triangle mais un (rond)
- 3/ Quand je suis à table, je bois de l'eau dans un (verre)
- 4/ Je me lave les dents avec une brosse à dents et du (dentifrice)
- 5/ Quand il neige, on fait des bonhommes de (neige)
- 6/ Avant de s'endormir, on éteint la (lumière)

- 1/ Les abeilles font du (miel)
- 2/ Quand on est en vacances, on ne va pas à l' (école)
- 3/ Dehors je mets des chaussures et dans la maison, je mets mes (chaussons)
- 4/ Dans leur biberon, les bébés boivent du (lait)
- 5/ Parfois les enfants ne rentrent pas chez eux le midi, ils mangent à la (cantine)
- 6/ Les cacahuètes sont salées et le miel est (sucré)

- 1/ En nous promenant dans les bois, nous avons ramassé des (champignons)
- 2/ La nuit on voit briller des (étoiles)
- 3/ Si mon nez coule, je me mouche avec un (mouchoir)
- 4/ Les oiseaux n'ont pas de maisons, ils dorment dans un (nid)
- 5/ Celui qui trouve la fève dans la galette est le (roi)
- 6/ Pour aller sur l'eau, on prend un (bateau)

ANNEXE 10. Empan de mots (sous-test du K-ABC)

➤ Mots en ordre direct

Consigne : « Je vais te dire des noms de choses dessinées. Quand j'aurai fini, je voudrais que tu touches avec ton doigt les dessins qui représentent ces choses. Montre-les exactement dans le même ordre que celui où je te les aurai dits. Par exemple, si je te dis Maison – Tasse » (on tourne la page pour que l'enfant puisse répondre).

- si le sujet répond correctement : « C'est bien »
- si le sujet échoue : « J'ai dit Maison – Tasse, donc tu dois toucher la maison, puis la tasse »

Avec 5 dessins : 

1/ Oiseau

2/ Oiseau – Clé

2/ Etoile – Maison

3/ Maison – Oiseau – Etoile

3/ Tasse – Clé – Oiseau

4/Clé – Oiseau – Etoile – Maison

Avec 7 dessins : 

4/ Lune – Arbre – Chat – Cœur

5/ Chat – Ballon – Chaussure – Lune – Main

➤ Mots en ordre inverse

Consigne : « Maintenant, je vais encore te dire des noms de choses dessinées. Mais cette fois quand j'aurais fini, je voudrais que tu touches avec ton doigt les dessins qui représentent ces choses à l'envers. Par exemple, si je te dis Oiseau – Clé, que dois-tu toucher ? »

- si le sujet répond correctement : « C'est bien »
- si le sujet échoue : « J'ai dit Oiseau - Clé, donc en premier, tu dois toucher la clé, puis l'oiseau »

Avec 5 dessins : 

2/ Clé – Maison

2/ Tasse – Oiseau

3/ Etoile – Tasse – Maison

3/ Oiseau – Clé – Etoile

4/ Maison – Etoile – Clé – Tasse

Avec 7 dessins : 

4/ Chat – Main – Chaussure – Ballon

5/ Chaussure – Arbre – Ballon – Cœur – Lune