

- Steffe, L. P., Liss, D. R. I., & Lee, H. Y. (2014). On the operations that generate intensive quantity. In L. P. Steffe, K. C. Moore, & L. L. Hatfield (Éds.), *Epistemic algebraic students: Emerging models of students' algebraic knowing* (pp. 49-79). University of Wyoming.
- Tempier, F. (2013). *La numération décimale à l'école primaire. Une ingénierie didactique pour le développement d'une ressource* [Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot – Paris VII]. HAL Thèses.
- Thanheiser, E. (2009). Preservice elementary school teachers' conceptions of multi-digit whole numbers. *Journal for Research in Mathematics Education*, 40(3), 251-281. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc.40.3.0251>
- Ulrich, C., & Wilkins, J. L. M. (2017). Using written work to investigate stages in sixth-grade students' construction and coordination of units. *International Journal of STEM Education*, 4(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40594-017-0085-0>
- Zhang, J., & Norman, D. A. (1995). A representational analysis of numeration systems. *Cognition*, 57, 271-295. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(95\)00674-3](https://doi.org/10.1016/0010-0277(95)00674-3)

Chapitre 3

Le transcodage numérique : lire et écrire les nombres

Marie-Pascale Noël

1. Introduction

Aux alentours de 2 ans, l'enfant est introduit au code verbal oral, notamment à travers l'acquisition de la chaîne numérique verbale. Quelques années plus tard, l'enfant se familiarise avec les symboles écrits du code arabe. Ces deux codes numériques symboliques, les nombres verbaux oraux et les nombres arabes, sont les codes les plus fréquemment utilisés dans nos vies quotidiennes bien que d'autres codes, comme le code verbal écrit ou encore le code des nombres romains, soient aussi utilisés. Le passage d'un de ces codes numériques à l'autre fait référence au transcodage. La lecture à voix haute des nombres arabes ou leur écriture sous dictée sont les processus de transcodage les plus fréquents. Dans la lecture, le code d'entrée est le code arabe et le code de sortie est le code verbal, et inversement pour la dictée.

Chacun de ces codes est caractérisé par un lexique spécifique, les chiffres de 0 à 9 pour le code arabe, et une trentaine de mots-nombres ou numéraux verbaux (un, deux, dix, onze, douze, vingt, mille...) pour le code verbal. Pour transcoder, il ne suffit pas de connaître ces différents lexiques et de les mettre en correspondance (savoir que 2 se dit *deux* et que *quinze* s'écrit 15). En effet, *mille trois cent quatre* ne s'écrit pas 1 000 3 100 4 ! Des processus syntaxiques sont également à l'œuvre dans le transcodage pour gérer les liens de combinaison entre ces différentes primitives lexicales.

Le code numérique arabe est un système positionnel en base 10 : le chiffre le plus à gauche du nombre est associé à la plus grande puissance de 10 et le dernier à droite est associé à la puissance zéro de 10 (s'il s'agit de nombres naturels). Ainsi, par exemple, 204 signifie 2×10^2 , plus 0×10^1 plus 4×10^0 (voir chapitre 2 sur la numération écrit par Osana et Barilaro pour plus de détails). Le code verbal présente lui aussi les mots dans un ordre particulier qui exprime soit des relations additives (par exemple, *vingt-quatre* signifie vingt *plus* quatre, ou *cent trois* signifie cent *plus* trois) et des relations multiplicatives (*trois cents* signifie trois fois

cent). Ainsi, tout nombre verbal peut être représenté comme une série de relations additives et multiplicatives entre les quantités de base exprimées par chaque mot. Par exemple, *trois mille deux cent quatre* signifie $(\text{trois} \times \text{mille}) + (\text{deux} \times \text{cent}) + \text{quatre}$ (Hurford, 1987). En français, les groupes de mots faisant référence à la plus grande puissance de 10 sont présentés d'abord, puis ceux faisant référence aux puissances de 10 plus petites (on dit *trois cents* [puis] *vingt-cinq* et pas l'inverse).

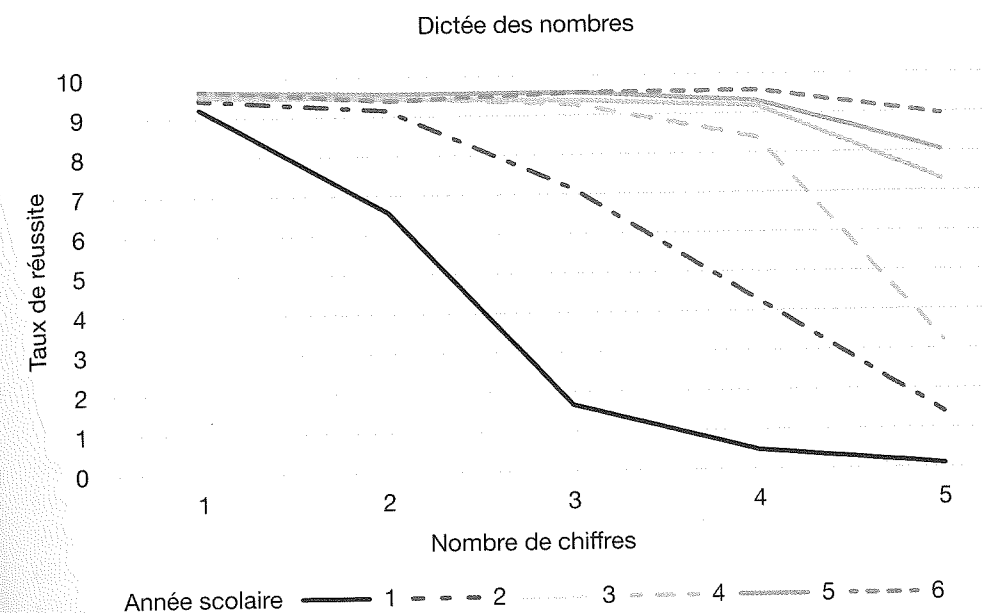
Dans ce chapitre, nous verrons comment se développent ces capacités de transcoding chez l'enfant, son importance dans le développement numérique plus global, les modèles théoriques qui rendent compte de ces processus et, enfin, l'influence de la mémoire de travail et des caractéristiques de la langue utilisée sur ces processus.

2. Développement du transcoding

Vasilyeva et collaborateurs (2022) ont mesuré les capacités de lecture de nombres arabes de jeunes enfants russes de maternelle. Dès 4 ans, ils observent plus de 94 % de réponses correctes en réponses aux nombres à un chiffre. Pour les nombres à deux chiffres, le taux de réponses correctes était de l'ordre de 54 % à 5 ans.

Noël et Turconi (1999) ont testé les capacités de lecture et d'écriture d'enfants belges francophones de 6 à 8 ans. Les performances dans les deux tâches étaient assez similaires et augmentaient avec l'âge de l'enfant. À 6 ans, les enfants avaient des performances quasi parfaites pour le transcoding des nombres à 1 chiffre et leur précision était d'environ 50 % pour les nombres à deux chiffres. À 7 ans, les performances étaient excellentes pour les nombres à deux chiffres et étaient de l'ordre de 80 % de réponses correctes pour les nombres à trois chiffres. Des résultats similaires ont été trouvés par Power et Dal Martello (1990) chez des enfants italiens âgés de 7 ans ; ceux-ci étaient capables d'écrire sous dictée des nombres arabes allant jusqu'à 100 mais des erreurs apparaissaient pour des nombres plus grands. Finalement, Noël et collaborateurs (1999) ont observé que les enfants de 8 ans étaient capables de transcoder presque parfaitement tous les nombres de un à quatre chiffres et que leur précision était d'environ 80 % pour les nombres à cinq chiffres. Ces résultats ont été répliqués par Karagiannakis et Noël (2020) sur une large population d'enfants néerlandophones (voir figure 1). Ces auteurs montrent également une très bonne performance dans le transcoding des nombres de un à cinq chiffres à partir de la 4^e année primaire (équivalent au CM1 en France) avec des pourcentages de réussite de l'ordre de 90, 93 et 95 % pour les 4^e, 5^e et 6^e années respectivement (équivalent au CM1, au CM2 et à la 6^e au collège en France). Ils observent aussi que les temps de réponse augmentent avec le nombre de chiffres à produire et diminuent au cours du développement.

Figure 1. Exactitude (10 = 100 % de réponses correctes) dans la tâche d'écriture sous dictée (Karagiannakis & Noël, 2020) chez des enfants de la 1^e (équivalent CP) à la 6^e année



Vous pouvez consulter la version couleur de ce graphique en scannant ce QR code ou en entrant cette adresse web dans votre navigateur.

Suite à l'analyse d'erreurs produites par des patients cérébrolésés, Deloche et Seron (1982a et b) soutiennent que le lexique du code numérique verbal serait stocké en mémoire sous forme de piles ou de classes ordonnées. Il y aurait la classe des unités (un, deux, ... neuf), des particuliers (onze, douze, ... seize), des dizaines (dix, vingt, ... nonante / quatre-vingt-dix). Pour reconnaître ou sélectionner un mot-nombre, nous aurions ainsi besoin d'avoir l'information de sa classe lexicale et de sa position dans sa classe. Par exemple, le mot de la classe des particuliers en deuxième position est le *douze*, alors que la dizaine en deuxième position est le *vingt*. En examinant la nature des erreurs produites, ces auteurs distinguent les erreurs lexicales et les erreurs syntaxiques. Les erreurs lexicales correspondent à la mauvaise sélection d'un mot ou d'un chiffre. Parmi celles-ci, on distingue les erreurs de classe (dire *trois* pour *trente* ou bien *quatorze* pour *quarante*) et les erreurs de position (dire *trois* pour *quatre* ou *quinze* pour *seize*). Les erreurs de Paul, 11 ans, sont des erreurs lexicales de position dans la classe (voir le tableau la extrait de Temple, 1989). Les erreurs syntaxiques concernent la combinaison des mots ou des chiffres qui forment le nombre et entraînent une modification du gabarit du nombre (par exemple, *vingt-sept* écrit 207). C'est le cas des erreurs de CM, un adolescent de 13 ans : il produit des nombres avec soit un nombre incorrect de zéros positionnels, soit un mauvais placement de ces zéros (voir tableau 1b, extrait de Sullivan et al., 1996).



<http://lienmini.fr/61751-01>

Tableau 1. Exemples des erreurs de transcodage produites par (a) Paul (Temple, 1989) et (b) par CM (Sullivan et al., 1996)

(a) Erreurs de Paul	(b) Erreurs de CM
<u>Dictée de nombres arabes</u>	<u>Dictée de nombres arabes</u>
Deux → 3	Trois mille cinq cent deux → 30520
Neuf → 8	Cent trois mille cinq cents → 100305
Nonante-neuf → 91	Soixante-six mille cent cinq → 6615
Sept cent onze → 511	Cinq cent six mille un → 5061
<u>Lecture de nombres arabes</u>	
1 → neuf	
85 → quatre-vingt-deux	
34 → septante-six	
153 → cent vingt-trois	

En règle générale, on peut observer quelques erreurs lexicales lors du transcodage chez de jeunes enfants mais les erreurs produites sont majoritairement de type syntaxique (Barrouillet et al., 2004 ; Camos, 2008 ; Power & Dal Martello, 1990, 1997 ; Seron & Fayol, 1994 ; Zuber et al., 2009). Power et Dal Martello (1990) ont analysé les erreurs commises par les enfants italiens de 7 ans. La plupart d'entre elles étaient des erreurs syntaxiques consistant principalement en la production de zéros supplémentaires (*trois cent soixante-cinq* → 30065 ou 3065). C'était également l'observation de Seron et al. (1991). Ces auteurs ont testé les élèves de 2^e et de 3^e années primaires (équivalent CE1 et CE2 en France), trois fois au cours de l'année scolaire pour examiner finement l'évolution de leurs capacités de transcodage. Ils ont constaté que lorsque les enfants sont confrontés à des nombres qu'ils ne peuvent pas écrire, tels que des nombres à trois chiffres, ils transcrivent d'abord chaque mot avec l'équivalent arabe (par exemple, *trois cent douze* → 310012), c'est ce qu'on appelle la lexicalisation. Ces enfants (qui maîtrisaient déjà la combinaison dizaine-unité des nombres à deux chiffres) vont progressivement apprendre à maîtriser la relation multiplicative entre Cent et l'Unité (comme dans *trois cents*). À ce stade, *trois cent douze* pour-rait être transcodé erronément « 30012 ». Ensuite, ces enfants apprennent à maîtriser la relation additive entre Cent et l'Unité. À ce stade, ils transcodent correctement un nombre comme *cent trois* (par 103) mais peuvent commettre des erreurs typiques sur des nombres présentant une relation additive entre Cent et la Dizaine (*trois cent vingt* écrit 3020) ou entre Cent et le Particulier (*trois cent treize* écrit 3013), généralisant à tort ce qu'ils ont appris sur des structures additives Cent-Unité aux structures Cent-Dizaine et Cent-Particulier. Enfin, ils seront capables de maîtriser toutes les relations additives avec Cent. Le même chemin de développement est également observé pour les nombres contenant Mille avec la maîtrise des relations multiplicatives précédant la maîtrise des relations additives.

3. Importance du transcodage

La capacité à lire et à écrire des nombres fait bien entendu partie des compétences numériques minimales dont nous avons besoin au quotidien, qu'il s'agisse de lire le prix d'un article à vendre ou de noter le numéro de téléphone d'un ami (voir les chapitres 18 et 14 traitant des impacts fonctionnels des troubles de la cognition mathématique, chez l'enfant, écrit par Gentelet & Lafay, chez l'adulte, écrit par Tarabon-Prévost). Dans le parcours scolaire de l'enfant, ces processus de transcodage sont également importants. Ainsi, chez des élèves de 1^e année primaire (équivalent CP en France), Geary et al. (1999) observent une association significative entre les capacités de lecture et d'écriture de nombres et la réussite à un test de mathématiques.

Karagiannakis et Noël (2020) répliquent ces résultats : la performance dans une tâche de dictée de nombres est significativement corrélée avec le score à un test global de mathématiques de la 1^e à la 5^e année primaire (équivalent CP et CM2 en France). En 6^e année primaire (équivalent 6^e collège en France), cette corrélation n'est toutefois plus significative, probablement dû à l'effet plafond dans la tâche de transcodage à cet âge (95 % de réussite pour la dictée de nombres de un à cinq chiffres).

Karagiannakis et Noël (2020) montrent également que les enfants les moins performants en mathématiques (avec des scores < centile 15 à un test global de mathématiques) ont des performances en transcodage inférieures à celle des enfants sans difficultés mathématiques, quelle que soit l'année scolaire de ces enfants (entre 1^e et 6^e année primaire, équivalent CP et 6^e collège en France). Des observations similaires sont rapportées par Moura et ses collègues (Moura et al., 2013, Moura et al., 2015) : les enfants ayant des difficultés en mathématiques sont moins performants que les enfants aux résultats typiques, de la 1^e à la 4^e année primaire (équivalent CP et CM1 en France), à la fois dans la lecture et dans l'écriture des nombres arabes. Notons cependant que ces différences ont des tailles d'effet qui diminuent au fur et à mesure de l'avancée dans le parcours scolaire.

Göbel et collaborateurs (2014) mesurent la capacité des enfants de 1^e année (équivalent CP en France) à choisir, parmi quatre ou cinq nombres arabes, celui qui correspond au nombre présenté oralement (des nombres de un à trois chiffres). Ces auteurs observent que la performance des enfants dans cette tâche est un très bon prédicteur de leurs capacités arithmétiques mesurées 11 mois plus tard.

De la même manière, Banfi et collaborateurs (2022) montrent que l'écriture des nombres arabes mesurée en 1^e année primaire (équivalent CP en France) prédit la performance en arithmétique à cet âge-là, mais également, un à deux ans plus tard (soit en 2^e et 3^e années primaires, équivalent CE1 et CE2 en France), au-delà même d'autres prédicteurs (raisonnement non-verbal, mémoire de travail, comparaison symbolique et non-symbolique de la magnitude). Par ailleurs, ces auteurs font cette observation à la fois chez des enfants anglophones mais aussi des enfants germanophones.

4. Modèles du transcodage

Plusieurs modèles de transcodage ont été publiés. Certains, comme celui de McCloskey et al. (1985) ou de Power et Dal Martello (1990) supposent que les processus de transcodage nécessitent la compréhension du nombre présenté en entrée, c'est-à-dire l'élaboration d'une représentation sémantique de la grandeur numérique qu'il représente, avant de pouvoir produire le nombre dans le code de sortie requis. On parle alors de modèles de transcodage sémantique. D'autres modèles, comme celui de Barrouillet et collaborateurs (*A Developmental Asemantic Procedural Transcoding model*, ADAPT, 2004), inspiré de Deloche et Seron (1987), supposent que l'on transcode les nombres en appliquant directement des règles ou des procédures sur le nombre présenté en entrée, pour produire le nombre dans le code de sortie. On parle alors de modèles de transcodage asémantiques. Enfin, le modèle du Triple Code de Dehaene (1992), un modèle mixte, suppose que nous disposons à la fois de voies de transcodage sémantique et asémantique.

4.1. Les modèles de transcodage sémantique

Les modèles de transcodage sémantique supposent que le nombre présenté en entrée doit être compris, avant de pouvoir produire le nombre dans le code de sortie requis. Ainsi, la lecture d'un nombre arabe nécessite la compréhension du nombre arabe et la capacité à produire le nombre verbal correspondant alors que l'écriture d'un nombre sous dictée nécessite de comprendre les nombres entendus et de pouvoir produire le nombre arabe correspondant.

Le processus de compréhension consiste à générer la représentation sémantique de la grandeur numérique représentée par ce nombre. Dans le modèle de McCloskey et al. (1985) la représentation sémantique est supposée refléter le système en base 10 : 45 ou *quarante-cinq*, par exemple, activerait une représentation du type suivant : $[4]10^1, [5]10^0$. Le modèle de Power et Dal Martello (1990), en revanche, suppose que la représentation sémantique reflète les relations additive et multiplicative du système verbal : les concepts de quantité (C_i pour la quantité i) sont liés par des relations additives et multiplicatives. Par exemple, pour le nombre *sept cent cinquante-quatre*, la représentation sémantique correspondante est : $C7 \times C100 + C5 \times C10 + C4$.

Cette représentation sémantique sert ensuite de base à la production du nombre dans le code approprié. Par exemple, dans le modèle de Power et Dal Martello (1990), la seconde étape de l'écriture de nombres arabes sous dictée consiste à produire un nombre arabe à partir de la représentation sémantique. Cette étape est réalisée par la mise en œuvre de deux opérateurs : l'opérateur de concaténation (&) pour gérer les relations multiplicatives ($C7 \times C100 \rightarrow 7 \& 00 \rightarrow 700$) et l'opération de surécriture (#) pour gérer les relations additives ($C100 + C5 \rightarrow 100 \# 5 \rightarrow 105$, les sommes ajoutées sont écrites par-dessus les chiffres du premier nombre en commençant par la droite). Ces auteurs observent qu'à 7 ans, les erreurs produites par les enfants reflètent pour

la majorité une difficulté dans la maîtrise de l'opération de surécriture (par exemple, *trois cent soixante-cinq* écrit 30065 ou 3065).

4.2. Les modèles de transcodage asémantique

Le modèle ADAPT (Barrouillet et al., 2004) ne suppose pas l'activation d'une représentation sémantique du nombre mais décrit un ensemble de procédures réalisées directement sur le nombre présenté en entrée. Par exemple, dans le cas d'une dictée de nombres arabes, la suite verbale présentée est encodée en mémoire à court terme et un processus d'analyse segmente cette chaîne en unités pouvant être traitées séquentiellement du début de la suite jusqu'à la fin de celle-ci au moyen d'un système de production. Ce système de production comprend des procédures de type condition-action.

Au début de l'apprentissage, chaque unité résultant du processus d'analyse contient un seul mot. Progressivement, des groupes de mots fréquemment perçus en succession temporelle directe (par exemple *quatre-vingt-dix*, ou des structures dizaine-unité, comme *dix-huit*) aboutissent à la formation de nouvelles unités représentationnelles.

Si les unités lexicales de l'entrée verbale correspondent à une forme arabe stockée dans la mémoire à long terme (par exemple, un 1, quinze 15), la forme digitale en question est directement récupérée en mémoire et produite. Dans le cas contraire, des règles spécifiques sont déclenchées et opèrent de manière récursive dans la chaîne verbale présentée afin de construire la forme de sortie correcte dans la notation arabe. Les conditions qui déclenchent une règle donnée peuvent être soit la classe des primitives lexicales (unité, dizaine, centaine, par exemple), soit la présence d'emplacements vides. Dans le cadre du transcodage des nombres de 1 à 100, ces règles déclenchent huit procédures différentes (voir tableau 2). Les auteurs rapportent d'ailleurs une grande corrélation entre le nombre d'erreurs de transcodage observées chez des enfants de 7-8 ans et le nombre de règles de transcodage à mettre en œuvre, tel qu'indiqué par leur modèle. Cette corrélation élevée est aussi rapportée par Moura et al. (2015) auprès d'enfants brésiliens de 6 à 12 ans.

Tableau 2. Procédures pouvant s'activer lors du transcodage des nombres de 1 à 100

1. Rechercher la valeur positionnelle de la primitive lexicale dans sa classe lexicale et récupérer le chiffre qui lui est associé.
2. Créer la séquence de chiffres en y plaçant ce chiffre ou, alternativement, en le plaçant dans l'emplacement vide d'une séquence déjà formée.
3. Ajouter un emplacement vide à droite de la chaîne de chiffres.
4. Créer une séquence de chiffres commençant par un 1.
5. Ajouter 1 au chiffre déjà placé dans la séquence.
6. Placer un 0 dans l'emplacement vide de la séquence de chiffres.
7. Introduire la primitive lexicale suivante dans le système de transcodage.
8. « Stop » détermine la fin de la construction de la chaîne de chiffres et l'envoi au système de transcription graphique.

5. Les défis du transcodage

5.1. D'où viennent les difficultés

Seron et Fayol (1994) s'interrogent sur l'origine des erreurs de dictée de nombres arabes chez les enfants de 2^e année primaire (équivalent CE1 en France). Selon le modèle de McCloskey et al. (1985), la dictée de nombres suppose la compréhension des nombres verbaux présentés et l'élaboration de la représentation sémantique correspondante et puis la production des nombres arabes correspondant à cette représentation sémantique. Les difficultés pourraient donc être liées soit au processus de compréhension, soit au processus de production, soit aux deux. Pour identifier le lieu de dysfonctionnement, les auteurs testent séparément la compréhension des nombres entendus (par une tâche de comparaison de deux nombres oraux ou la sélection de jetons correspondant à un nombre oral présenté) et la capacité de production des nombres arabes (par une tâche d'écriture en nombres arabes d'une quantité représentée par des jetons). Ils constatent que les difficultés des enfants viennent principalement de la production de nombres arabes.

Seron et collaborateurs (1997) utilisent une approche similaire pour comprendre les erreurs commises par les élèves de 1^e année primaire (équivalent CP en France) lors de la lecture à voix haute des nombres arabes. Ils constatent que, si certaines erreurs de lecture sont éventuellement imputables aux difficultés de production des nombres verbaux oraux, la plupart des erreurs de lecture viennent d'une difficulté au niveau de la compréhension des nombres arabes. Ce serait donc le code arabe, dans son aspect de compréhension ou de production, qui poserait davantage de défis aux enfants. Cette conclusion est également compatible avec les résultats d'autres études montrant des liens entre la performance en transcodage et des tâches mesurant la compréhension des nombres arabes.

Ainsi, Dietrich et collaborateurs (2016) observent, chez des enfants de 1^e année primaire (équivalent CP en France), une corrélation entre la précision mesurée dans une tâche d'écriture de nombres arabes sous dictée et celle observée dans le placement de nombres sur une ligne allant de 0 à 100.

Vasilyeva et collaborateurs (2022) montrent que chez de jeunes enfants de 5 ans, les capacités de lecture de nombres arabes corrélaient avec les capacités à représenter ces nombres arabes avec des jetons (des blocs de 1 ou des barres de 10). Cette corrélation est encore plus forte si on considère, dans la tâche de représentation, les réponses correctes dans lesquelles l'enfant sélectionne des barres de 10 et des blocs de 1, plutôt que simplement des blocs de 1. En effet, les enfants qui utilisent majoritairement une représentation avec des barres de 10 et des blocs de 1 ont une meilleure performance en lecture de nombres arabes (88 %) que ceux qui utilisent uniquement des blocs de 1 (63 %) et surtout que ceux qui ont des réponses incorrectes dans cette tâche (< 30 %). Enfin, la performance dans cette tâche de représentation corréla avec le taux d'erreurs syntaxiques, et non pas lexicales, dans la tâche de lecture.

Or, le code arabe représente la base 10 au travers d'un système positionnel : chaque chiffre correspond à une quantité associée à une puissance de 10 qui diffère selon la position qu'il occupe dans le nombre. Ainsi, la compréhension, *a minima*, de ce système positionnel est nécessaire pour déterminer lequel des deux nombres, 12 ou 21 est le plus grand, mais pas nécessairement pour comparer 35 et 36 par exemple. C'est cette capacité de comparaison de nombres à deux chiffres que Cheung et Ansari (2021) mesurent chez des enfants entre 4 et 7 ans. Ils observent qu'à partir de 6 ans, la performance des enfants est au-dessus du hasard. Ils montrent en outre que seuls les enfants qui sont capables de lire correctement les deux nombres présentés sont capables de déterminer lequel des deux est le plus grand.

Herzog et Fritz (2022) mesurent le lien entre la compréhension de la valeur positionnelle des chiffres dans le système numérique arabe et l'écriture de nombres arabes sous dictée chez des enfants de 2^e et 3^e années primaires (équivalent CE1 et CE2 en France). Ils notent, eux aussi, dans les deux classes, une forte corrélation entre les performances de transcodage et la compréhension de la valeur positionnelle (en 2^e, $r = 0,638$, et en 3^e, $r = 0,582$). Selon les auteurs, ces résultats montrent que l'écriture des nombres repose principalement sur l'identification des valeurs positionnelles.

En résumé, toutes ces études montrent des liens étroits entre les capacités de transcodage et les capacités des enfants à comprendre la grandeur des nombres arabes, y compris leur représentation en base 10, inscrite dans un système positionnel. Cet ensemble de résultats nous semble bien plus en cohérence avec les modèles sémantiques du transcodage qu'avec les modèles asémantiques. Bien sûr, cela ne signifie pas qu'il ne puisse y avoir de personnes qui, bien que ne comprenant pas la grandeur numérique des nombres, soient néanmoins capables de les transcrire, mais ceci semble être l'exception plutôt que la règle.

5.2. Le lien avec la mémoire

La mémoire de travail semble également être impliquée dans les processus de transcodage. Ce serait tout particulièrement le cas dans la dictée de nombres puisqu'il s'agit-là de maintenir en mémoire la séquence présentée oralement tout en mettant en œuvre les processus de transcodage.

Ainsi, Zuber et collaborateurs (2009) montrent (chez des enfants de 7 ans) que le taux d'erreurs de transcodage est lié aux capacités de la mémoire de travail. Plus spécifiquement, il semble que l'administrateur central joue un rôle particulier dans la prévention des erreurs d'inversion (les items sont présentés en allemand) alors que les autres types d'erreurs syntaxiques seraient liées aux capacités de la mémoire visuospatiale. Pixner et son équipe (2011) observent que le taux d'erreur en transcodage en 1^e année primaire (équivalent CP en France) est corrélé avec les capacités de l'administrateur central mais pas de celles des systèmes esclaves (boucle phonologique et calepin visuospatial) de la mémoire à court terme. De la même manière, Imbo et al. (2014) montrent, chez des enfants néerlandophones et francophones de

7 ans, que les capacités de mémoire de travail sont les seuls prédicteurs significatifs du taux d'erreurs de transcoding. Seuls Lafay et collaborateurs (2023) n'observent pas ce lien (chez des enfants francophones de 3^e année primaire, équivalent CE2 en France) entre la performance en dictée de nombres et les empanns mnésiques.

6. Influence de la structure de la langue

Les nombres verbaux diffèrent d'une langue à l'autre, non seulement en termes de lexique, mais aussi en termes de syntaxe. Plusieurs études ont montré que l'écriture de nombres arabes est largement influencée par la structure de la langue dans laquelle les nombres sont dictés. Les premiers travaux de ce type se sont intéressés aux langues asiatiques qui, pour la plupart, présentent une structure verbale très transparente à la base 10. Ainsi, un nombre comme 14 se dit littéralement « dix quatre » et 25 « deux dix cinq ». Miura et collaborateurs (1993, 1994) montrent ainsi que les enfants asiatiques de diverses origines (Chine, Corée, Japon) ont de meilleures capacités d'écriture des nombres arabes que les enfants occidentaux (Amérique, France, Suède).

Plus récemment, des résultats similaires ont été rapportés par Lê et Noël (2022). Ces auteurs ont comparé la performance d'enfants belges francophones et d'enfants vietnamophones de 1^{re} année primaire (équivalent CP en France). Deux tâches leur étaient présentées : l'écriture de nombres arabes sous dictée ou bien à partir d'un matériel analogique (bâtons et fagots de 10 bâtons). Dans les deux tâches, les enfants vietnamophones ont obtenu de meilleurs résultats que les enfants francophones. Les enfants francophones ont commis plus d'erreurs lexicales que les enfants vietnamophones, alors que les taux d'erreurs syntaxiques étaient équivalents. Les auteurs concluent que ces différences sont expliquées, soit par la plus grande transparence du système verbal vietnamien à la base 10, soit par leur lexique numérique plus réduit.

D'autres études se sont intéressées à des variations subtiles entre deux systèmes numériques issus de la même langue. Ainsi, en français, le système numérique diffère entre la Belgique et la France. En France, les nombres entre 69 et 99 montrent une trace de base sexagésimale (base 60) pour les nombres de *soixante-dix* à *soixante-dix-neuf* et vigésimale (base 20) pour les nombres de *quatre-vingt* jusqu'à *quatre-vingt-dix-neuf*. Les Belges, par contre, utilisent des structures décimales pour tous les nombres sauf *quatre-vingt* (*septante* et *nonante* désignent, respectivement, la septième et la neuvième dizaine). Dans une comparaison entre les enfants francophones de France et de Belgique, Seron et Fayol (1994) observent des performances équivalentes pour les nombres inférieurs à 60 et pour ceux qui avaient 80 pour dizaine. En revanche, pour les nombres avec une structure plus complexe en français de France, les Français produisent plus d'erreurs que les Belges (avec des erreurs du type, *soixante-quinze* écrit 6015).

Cette difficulté particulière des enfants français pour les dizaines complexes est également rapportée par Saad (2010) : 90 % des erreurs commises par des élèves de 1^{re} année primaire (équivalent CP en France) sur des nombres à deux chiffres concernent des dizaines complexes. Camos (2008) constate aussi que les élèves français de 2^e année primaire (équivalent CE1 en France) font plus d'erreurs si les nombres comportent une dizaine complexe. Ces observations sont aussi relevées par Lafay et al. (2023) chez des élèves canadiens, franco-québécois, de 3^e année primaire (équivalent CE2 en France) : la performance en transcoding est liée à la taille des nombres et à la présence ou non d'une dizaine complexe. Van Rinsveld et Schiltz (2016) rapportent une différence similaire en comparant le français (de France) et l'anglais (les nombres anglais suivent la structure décimale). En 5^e année (équivalent CM2 en France), les enfants anglophones ont de meilleures performances que les enfants francophones pour les nombres qui suivent une structure vigésimale en français mais une structure décimale en anglais. Lachelin et collaborateurs (2022) observent, chez des participants bilingues, un coût pour le transcoding des dizaines complexes en français, par comparaison avec l'allemand, chez des jeunes luxembourgeois de 5^e, 8^e, 11^e année (équivalent CM2, 4^e au collège et 1^{re} au lycée en France) et des adultes. Il faut noter que dans ce pays, les mathématiques sont d'abord enseignées en allemand (jusqu'en 7^e année ; équivalent 5^e au collège) et puis en français.

Enfin, de nombreuses autres études ont examiné l'impact des langues comme le néerlandais ou l'allemand, dans lesquelles la prononciation des nombres à deux chiffres est inversée puisque le mot de l'unité se prononce avant celui de la dizaine. Par exemple, en néerlandais, 64 se dit *vierenzestig*, littéralement, « quatre et soixante ». Krinzing et al. (2011) montrent que les enfants néerlandophones et germanophones (de 2^e année primaire, équivalent CE1 en France) commettent plus d'erreurs de transcoding que les enfants francophones.

Pixner et al. (2011) s'intéressent aux enfants tchèques qui ont la particularité d'apprendre deux systèmes numériques : un système à la maison avec l'ordre des dizaines-unités inversé et un autre système numérique, à l'école, qui est non-inversé (25 peut se dire *pařadvacet* [5-et-20] ou *dvacetpať* [20-5]). Les auteurs soumettent des enfants de 1^{re} année primaire (équivalent CP en France) à une tâche d'écriture de nombres arabes sous dictée. Les mêmes nombres sont dictés dans deux systèmes. Les enfants produisent plus d'erreurs dans le système inversé (49 %) que dans le système non inversé (37 %), dont, bien sûr, des erreurs d'inversion (soit, par exemple, écrire 46 au lieu de 64).

Imbo et al. (2014) proposent une dictée de nombres arabes à des élèves de 2^e année primaire (équivalent CE1 en France) parlant soit le néerlandais, soit le français. Ils observent des taux d'erreur similaires dans les deux groupes mais beaucoup plus d'erreurs d'inversion chez les enfants néerlandophones que chez les enfants francophones.

Chez des enfants germanophones en 1^{re} année primaire (équivalent CP en France), près de 50 % des erreurs de transcoding sont des erreurs d'inversion (Zuber

et al., 2009). Dans une comparaison entre enfants germanophones et anglophones (suivis de la 2^e à la 3^e année soit CE1 et CE2) dans une tâche de vérification de la correspondance entre un nombre verbal et un nombre arabe, on note un ralentissement lorsqu'il s'agit de rejeter un distracteur inverse chez les germanophones (comme par exemple, *vingt-quatre* et 42, Steiner et al., 2021).

Des résultats similaires indiquant une proportion plus élevée d'erreurs d'inversion dans les langues avec inversion des mots-nombres sont aussi rapportés par Moeller et son équipe (2015) dans la comparaison d'enfants allemands et d'enfants japonais de 7 ans (langue sans inversion avec un système numérique verbal transparent à la base 10) avec une tâche de dictée de nombres arabes (de un à trois chiffres). Les enfants germanophones produisent plus d'erreurs que les enfants japonais (7 % *versus* 1 %), quelle que soit la catégorie d'erreurs mais avec, bien entendu, beaucoup plus d'erreurs syntaxiques et parmi celles-ci, beaucoup plus d'erreurs d'inversion.

En résumé, ces études montrent que le transcoding est plus facilement maîtrisé lorsque le système verbal est plus transparent vis-à-vis de la base 10 et que l'ordre de prononciation des mots suit l'ordre des chiffres dans le nombre arabe.

7. Conclusion

Le transcoding est un processus complexe alliant des mécanismes lexicaux et syntaxiques à la fois pour le traitement des codes numériques d'entrée et de sortie. Son apprentissage se déroule pour la plupart entre 4 à 11 ans environ. Au départ, on observe des erreurs lexicales mais celles-ci disparaissent assez rapidement laissant place majoritairement à des erreurs syntaxiques. Surtout lors des premières années mathématiques plus larges. Différents modèles du transcoding ont été proposés, se distinguant essentiellement par l'hypothèse d'un passage obligé ou non par l'activation de la représentation sémantique du nombre transcodé. À l'heure actuelle, aucune donnée claire ne permet d'invalidier l'un des modèles proposés. Toutefois, plusieurs recherches montrent des liens étroits entre les capacités de transcoding et les capacités à construire une représentation sémantique des nombres en question, qu'il s'agisse de comparer leur magnitude, de les placer sur une ligne numérique ou de les représenter avec un matériel en base 10. Selon nous, ces recherches s'alignent davantage avec une modélisation sémantique du transcoding. Il a également été montré que les processus de transcoding demandent des ressources en mémoire de travail, en particulier dans le cas de la dictée de nombres. Enfin, plus la langue est transparente à la base 10, plus les enfants maîtrisent rapidement les processus de transcoding. *A contrario*, les langues qui utilisent des traces de base vigésimale ou qui inversent l'ordre de la dizaine et de l'unité amènent à des défis d'apprentissage supplémentaires.

Bibliographie

- Banfi, C., Clayton, F. J., Steiner, A. F., Finke, S., Kemény, F., Landerl, K., & Göbel, S. M. (2022). Transcoding counts : Longitudinal contribution of number writing to arithmetic in different languages. *Journal of Experimental Child Psychology*, 223, 105482. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jecp.2022.105482>
- 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. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.2.368>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.06.006>
- Cheung, P., & Ansari, D. (2021). Cracking the code of place value: The relationship between place and value takes years to master. *Developmental Psychology*, 57, 227-240. <https://doi.org/10.1037/dev0001145>
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90049-n](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-n)
- Deloche, G., & Seron, X. (1982a). From one to 1: An analysis of transcoding process by means of neuropsychological data. *Cognition*, 12, 119-149. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(82\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0010-0277(82)90009-9)
- Deloche, G., & Seron, X. (1982b). From three to 3: A differential analysis of skills in transcoding quantities between patients with Broca's and Wernicke's aphasia. *Brain*, 105, 719-733. <https://doi.org/10.1093/brain/105.4.719>
- 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). Lawrence Erlbaum.
- Dietrich, J. F., Huber, S., Dackermann, T., Moeller, K., & Fischer, U. (2016). Place-value understanding in number line estimation predicts future arithmetic performance. *The British Journal of Developmental Psychology*, 34(4), 502-517. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12146>
- 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(3), 213-239. <https://doi.org/10.1006/jecp.1999.2515>
- Göbel, S.M., Watson, S.E., Lervåg, A., & Hulme, C. (2014). Children's arithmetic development: It is number knowledge, not the approximate number sense, that counts. *Psychological Science*, 25(3), 789-798. <https://doi.org/10.1177/0956797613516471>

- Herzog, M., & Fritz, A. (2022). Place value understanding explains individual differences in writing numbers in second and third graders but goes beyond. *Frontiers in Education*, 6, 642153. <https://doi.org/10.3389/educ.2021.642153>
- Hurford, J. R. (1987). *Language and number*. Basic Blackwell.
- Imbo, I., Vanden Bulcke, C., De Brauwer, J., & Fias, W. (2014). Sixty-four or four-and-sixty? The influence of language and working memory on children's number transcoding. *Frontiers of Psychology*, 5, 313. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00313>
- Karagiannakis, G., & Noël, M.-P. (2020). Mathematical profile test: A preliminary evaluation of an online assessment for mathematics skills of children in grades 1–6. *Behavioral Sciences*, 10(8), 126. <https://doi.org/10.3390/bs10080126>
- Krinzinger, H., Gregoire, J., Desoete, A., Kaufmann, L., Nuerk, H. C., & Willmes, K. (2011). Differential language effects on numerical skills in second grade. *Journal of Cross Cultural Psychology*, 42, 614–629. <https://doi.org/10.1177/0022022111406252>
- Lachelin, R., van Rinsveld, A., Poncin, A., Schiltz, C. (2022). Number transcoding in bilinguals – A transversal developmental study. *PLOS ONE*, 17(8), e0273391. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273391>
- Lafay, A., Adrien, E., Lonardo Burr, S. D., Douglas, H., Provost-Larocque, K., Xu, C., LeFevre, J.-A., Maloney, E. A., Osana, H. P., Skwarchuk, S.-L., & Wylie, J. (2023). Transcoding of French numbers for first- and second-language learners in third grade. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 77(2), 387–407. <https://doi.org/10.1177/17470218231174339>
- Lê, M. L., & Noël, M.-P. (2022). Transparent Vietnamese number-naming system facilitates first graders transcoding – A cross-linguistic study with French. *Cognitive Development*, 61, 101145. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2021.101145>
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, 4, 171–196. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(85\)90069-7](https://doi.org/10.1016/0278-2626(85)90069-7)
- Miura, I. T., Okamoto, Y., Kim, C. C., Steere, M., & Fayol, M. (1993). First graders' cognitive representations of number and understanding of place value: Cross-national comparisons. *Journal of Educational Psychology*, 85(1), 24–30. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.85.1.24>
- Miura, I.T., Okamoto, Y., Kim, C.C., Chang, C.M., Steere, M., & 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. <https://doi.org/10.1177/016502549401700301>
- Moeller, K., Zuber, J., Olsen, N., Nuerk, H. C., & Willmes K. (2015). Intransparent German number words complicate transcoding—A translingual comparison with Japanese. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00740>

- Moura, R., Lopes-Silva, J. B., Vieira, L. R., Paiva, G. M., de Almeida Prado, A. C., Wood, G. & Haase, V. G. (2015). From « Five » to 5 for 5 minutes: Arabic number transcoding as a short, specific, and sensitive screening tool for mathematics learning difficulties. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 30, 88–98. <https://doi.org/10.1093/arclin/acu071>
- Moura, R., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K., & Haase, V. G. (2013). Transcoding abilities in typical and atypical mathematics achievers: The role of working memory and procedural and lexical competencies. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116(3), 707–727. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.07.008>
- Noël, M. P., & Turconi, E. (1999). Assessing number transcoding in children. *European Review of Applied Psychology*, 49(4), 295–302.
- Pixner, S., Zuber, J., Hermanova, V., Kaufmann, L, Nuerk, H.-C., & Moeller, K. (2011). One language, two number-word systems and many problems: Numerical cognition in the Czech language. *Research in Developmental Disabilities*, 32, 2683–2689. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.06.004>
- Power, R. J. D., & Dal Martello, M. F. (1990). The dictation of Italian numerals. *Language and Cognitive Processes*, 5, 237–254. <https://doi.org/10.1080/01690969008402106>
- 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. <https://doi.org/10.1080/135467997387489>
- Saad, L. (2010). *Transcodage des nombres chez l'enfant : approche développementale, inter-linguistique et différentielle* [Number Transcoding in children : a developmental, cross-linguistic, and differential approach] [Unpublished doctoral dissertation]. Université de Bourgogne.
- Seron, X., & Fayol, M. (1994). Number transcoding in children: A functional analysis. *British Journal of Developmental Psychology*, 12, 281–300. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1994.tb00635.x>
- Seron, X., Deloche, G., & Noël, M. P. (1991). Un transcodage des nombres chez l'enfant : la production des chiffres sous dictée, in J. Bideaud, C. Meljac, & J. P. Fisher (Eds), *Les Chemins du Nombre*, (pp. 303–327). PUL.
- Seron, X., Noël, M.-P., & Van der Elst, G. (1997, September). *Where do Arabic number reading errors come from?* Paper presented at the 8th European Conference on Developmental Psychology, Rennes (France).
- Steiner, A. F., Banfi, C., Finke, S., Kemény, F., Clayton, F., Göbel, S. M., & Landerl, K. (2021). Twenty-four or four-and-twenty: Language modulates cross-modal matching for multi-digit numbers in children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 202, 104970. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2020.104970>

- Sullivan, K. S., Macaruso, P., & Sokol, S. M. (1996). Remediation of Arabic numeral processing in a case of developmental dyscalculia. *Neuropsychological Rehabilitation*, 6(1), 27-53. <https://doi.org/10.1080/713755495>
- Temple, C. M. (1989). Digit dyslexia: A Category-specific disorder in development dyscalculia. *Cognitive Neuropsychology*, 6, 93-116. <https://doi.org/10.1080/02643298908253287>
- Van Rinsveld, A., & Schiltz, C. (2016). Sixty-twelve = Seventy-two? A cross-linguistic comparison of children's number transcoding. *British Journal of Developmental Psychology*, 34, 461-468. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12151>
- Vasilyeva, M., Laski, E., Veraksa, A., Bukhalenkova, D. (2022). What children's number naming errors tell us about early understanding of multidigit numbers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 224, 105510. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2022.105510>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.04.003>