La dyscalculie de l'enfant:

une difficulté dans le calcul et le traitement du nombre

Marie-Pascale Noël
Chercheuse qualifiée au FNRS et professeur à l'UCL
Unité de Cognition et Développement
Faculté de psychologie
1 place Cardinal Mercier
1348 Louvain-la-neuve
marie-pascale.noel@psp.ucl.ac.be

A paraître dans le traité de neuropsychologie de l'enfant
Edité par M; Poncelet, S. Majerus et M. Vanderlinden
Remerciements: Le présent auteur est supporté par le Fonds National de la Recherche Scientifique et bénéficie également d'une action de recherches concertées, ARC #01/06-267.

Résumé

La dyscalculie développementale est un trouble d'apprentissage aussi fréquent que la dyslexie. Elle renvoie à des difficultés au niveau du transcodage, de l'acquisition des faits arithmétiques, des procédures de calcul écrit, voire même aussi, au niveau de la sémantique même du nombre. Ce chapitre fait état de trois hypothèses étiologiques: une hypothèse soulignant une possible contribution génétique, une hypothèse neurobiologique pointant un éventuel dysfonctionnement pariétal sous-jacent et une hypothèse purement cognitive soulignant le rôle des capacités faibles de mémoire de travail et d'inhibition dans les difficultés de calcul éprouvées par les enfants dyscalculiques. Ce chapitre aborde ensuite le cas des acalculies acquises chez l'enfant et souligne la contribution importante, mais non exclusive, de l'hémisphère gauche dans l'apparition de ce type de difficultés. Enfin, le manuscrit se clôture par une perspective plus pratique dans laquelle trois outils diagnostiques sont présentés (l'UDN2, le Numerical et le tedi-math) ainsi que quelques pistes de remédiation.

I. Brève introduction

Les recherches relatives à la dyscalculie chez l'enfant sont très réduites par rapport à celles portant sur d'autres difficultés d'apprentissages (la dyslexie en particulier). Le diagnostic de dyscalculie est moins souvent posé et il donne plus rarement lieu à une prise en charge. Pourtant, les études épidémiologiques indiquent que la fréquence d'occurrence de la dyscalculie est tout à fait comparable à celle de la dyslexie. Ce chapitre vise à introduire le lecteur à ce domaine peu connu en présentant une définition et une description des troubles ainsi qu'un aperçu des hypothèses causales envisagées à l'heure actuelle. Parmi celles-ci, nous en détaillerons plus particulièrement deux. La première part de l'observation du rôle majeur du cortex pariétal dans les traitements numériques et suppose que des particularités dans le fonctionnement de cette zone cérébrale pourraient être liées à la dyscalculie. Suivant la seconde, des facteurs cognitifs généraux comme une réduction des capacités de mémoire de travail, pourraient, en partie au moins, expliquer les difficultés d'apprentissage des enfants dyscalculiques. Ensuite, nous synthétiserons les quelques travaux relatifs à l'acalculie acquise chez l'enfant à la suite d'un dommage cérébral. Pour terminer, nous décrirons quelques outils d'évaluation disponibles en langue française et présenterons deux démarches de rééducation.

II. Le développement numérique normal: un rapide aperçu

Pour de nombreux auteurs (Dehaene, Dehaene-Lambertz & Cohen, 1998; Gallistel & Gelman, 1992; Wynn, 1995, 1998), le bébé naît avec un détecteur de la quantité numérique, ou encore de la *numérosité* qui lui permet de discriminer le cardinal[1] de deux collections, de les comparer, voire d'être sensible aux changements de type additif ou soustractif. Pour d'autres (Mix, Huttenlocher & Levine, 2002; Rousselle, Palmers & Noël, 2004), cette sensibilité première ne serait pas liée à une représentation de la numérosité en tant que telle mais plutôt de la quantité, c'est-à-dire, d'une représentation de paramètres physiques continus comme l'étendue ou la surface occupée par les collections (pour un exposé de ce débat, voir Palmers & Noël, 2004).

Aux alentours de 2-3 ans, l'enfant entre dans l'univers symbolique des nombres par l'acquisition des premiers numéraux[2] verbaux oraux. Progressivement, il pourra réciter ces mots-

---

[1] Le cardinal d'un ensemble correspond au nombre d'éléments contenus dans cet ensemble.

[2] Lorsqu'on parle d'un nombre exprimé dans un code particulier (par exemple dans le code verbal oral ou écrit ou encore dans le code arabe), on parle de numéral. Le numéral *5* renvoie

nombres suivant l'ordre conventionnel, c'est ce qu'on appelle, la chaîne numérique verbale. Celle-ci se développe dans deux directions (Fuson, Richards & Briars, 1982): (1) une étendue vers des nombres de plus en plus grands et (2) une évolution progressive allant d'une suite indifférenciée de type "chapelet" à une suite de plus en plus élaborée dans laquelle les mots sont différenciés, récités dans les deux sens, et considérés comme des entités pouvant elles-mêmes être comptées. La maîtrise de la chaîne numérique verbale va permettre l'activité de dénombrement de collections, soit, la mise en correspondance du pointage des objets et de la récitation de la chaîne numérique verbale, en vue de déterminer de manière précise le cardinal de la collection (Gelman et Gallistel, 1978). Ces activités de dénombrement vont également être utilisées de manière naturelle par les petits enfants pour résoudre des opérations arithmétiques simples[3]. Ainsi, dès 4 ou 5 ans, un enfant qui possède trois bonbons et à qui l'on offre deux autres friandises, dénombre la collection formée de ces deux ensembles pour obtenir la somme de 3+2 (Baroody, 1987). Sans instruction explicite, l'enfant va progressivement découvrir et utiliser d'autres stratégies de calculs plus économiques, comme par exemple, le comptage à partir du plus grand terme (2 + 7 = 7, 8, 9) ou encore la décomposition (pour réaliser 4+5, l'enfant se base sur 4+4 dont il connaît la réponse (stockée en mémoire à long terme) et y ajoute 1).

Parallèlement à cet apprentissage du calcul, l'enfant sera introduit à un autre code symbolique. Ainsi, dès 5-6 ans, il se familiarise avec les numéraux arabes et apprend à établir des correspondances entre ce code écrit et le code verbal oral. Ces opérations d'un passage d'un code à l'autre (par exemple, lire ou écrire sous dictée des nombres arabes) sont appelées *transcodage*. Pour la grande majorité des enfants, le système numérique arabe (pour les nombres jusqu'à un million) est parfaitement maîtrisé vers 9 ans (voir, Noël, 1991).

Par la suite, l'enfant ira de plus en plus loin dans la découverte des nombres (les nombres décimaux, les fractions …), des opérations de calcul (multiplication, division) et des algorithmes pour réaliser des opérations complexes. Il devra également découvrir les notions de mesures, de poids et les conversions d'un système métrique à l'autre, etc.

Cet apprentissage riche sera cependant la source de difficultés diverses. Par conséquent, et comme nous le découvrirons dans la suite de ce chapitre, la dyscalculie est elle aussi multiple.

---

au chiffre arabe, le numéral *cinq* au nombre verbal écrit et le numéral */cinq/* au nombre verbal oral.

[3] Notons que des enfants plus jeunes sont capables de réaliser des opérations sur une base non-verbale (Starkey, 1992; Levine, Jordan, & Huttenlocher, 1992).

III. La dyscalculie développementale: définition

Selon Temple (1992b), la dyscalculie développementale est "*un trouble des compétences numériques et des habiletés arithmétiques qui se manifeste chez des enfants d'intelligence normale qui ne présentent pas de déficit neurologique acquis*" (p. 211). La dyscalculie ne se limite donc pas à des problèmes au niveau du calcul proprement dit. En effet, un enfant avec des capacités de calcul mental normales mais de grosses lacunes dans l'écriture et la lecture des nombres peut être considéré comme dyscalculique. L'évaluation doit donc tenir compte des différentes facettes du domaine numérique: le comptage, le calcul, la maîtrise des systèmes numériques, la résolution des problèmes, …. Temple souligne également le contexte d'intelligence normale dans lequel doit s'inscrire la dyscalculie. Nous pensons toutefois que, même dans les cas de déficience intellectuelle, il est important d'examiner la mesure dans laquelle les compétences numériques correspondent ou non au niveau cognitif global de l'enfant. C'est précisément ce point de vue qui est adopté par le manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (DSM IV, American Psychiatric Association, 1994). Dans ce manuel, trois critères diagnostiques de la dyscalculie sont proposés: (1) les aptitudes arithmétiques, évaluées par des tests standardisés, sont nettement en-dessous du niveau escompté compte tenu de l'âge du sujet, de son niveau intellectuel et d'un enseignement approprié à son âge; (2) cette perturbation interfère de manière significative avec la réussite scolaire de l'enfant ou les activités de la vie courante et (3) les difficultés en mathématique ne sont pas la résultante de déficit sensoriel.

IV. Prévalence de la dyscalculie développementale

Bien que moins connue que la dyslexie, la dyscalculie n'en est pas moins fréquente. Une série d'études épidémiologiques a ainsi montré que 5% environ des enfants présentaient une difficulté d'apprentissage en mathématique. Ainsi, Kosc (1974) étudie 375 enfants Tchécoslovaques de 10-12 ans et pose un diagnostic de dyscalculie chez 24 d'entre eux (6,4%). Badian (1983) analyse un échantillon de 1476 enfants américains âgés de 7 à 14 ans et détecte la présence de difficultés en mathématique non associées à des difficultés de lecture auprès de 3,6% d'entre eux, alors que 2,7 % autres sujets présentent des retards à la fois en mathématique et en lecture. En Grande-Bretagne, Lewis, Hitch et Walker (1994) observent des difficultés en mathématique chez 1,3 % d'un échantillon de 1056 enfants âgés de 11 ans, 3,9 % de problèmes en lecture et des difficultés dans les deux domaines chez 2,3% des écoliers. Enfin, Gross-Tsur, Manor et Shalev (1996) testent un groupe de 3029 enfants de 4ième année et détectent une dyscalculie dans 6,5% des cas.

Toutes ces études s'accordent donc à montrer une incidence comparable des troubles de l'apprentissage en mathématique et en lecture. Les prévalences obtenues sont toutefois entièrement fonction des critères utilisés. Ainsi, il est normal qu'un critère du type "score inférieur au percentile 20 de tel test" (comme c'est le cas pour l'étude de Badian) donne lieu à une prévalence plus importante que celle obtenue avec un critère plus strict exigeant un score inférieur au percentile 10 ou 5 par exemple. La question du percentile limite reste ouverte. Un autre type de critère possible est celui du "retard développemental". Gross-Tsur et coll. (1996), par exemple, considèrent qu'un enfant est dyscalculique s'il obtient un score qui est inférieur ou égal à celui correspondant au score moyen obtenu par des enfants fréquentant des classes scolaires deux années en-dessous de la sienne. Ces auteurs montrent qu'un tel critère amène également à considérer que plus de 6% des enfants présentent une dyscalculie.

Ces études soulignent aussi l'importance de la comorbidité dans ces populations. Ainsi, les enfants dyscalculiques présentent souvent des troubles d'apprentissage de la lecture (dans 43% des cas chez Badian, 64% des cas chez Lewis et coll., et 17,1% chez Gross-Tsur et coll., 1996), ou des troubles de l'attention (25,7 % chez Gross-Tsur et coll., 1996). Il faut toutefois signaler que la dyscalculie n'est pas le propre d'enfants moins doués sur le plan intellectuel. Ainsi, le QI moyen des enfants dyscalculiques de l'étude de Gross-Tsur et coll. est tout à fait dans la norme, avec cependant une légère (mais significative) supériorité du QIP (moyenne de 102.4) par rapport au QIV (moyenne de 94.8 quand le sous-test d'arithmétique n'est pas pris en compte). La fréquence des troubles ne diffère pas non plus selon le sexe (ratio filles - garçons de 11:10 chez Gross-Tsur et coll., 1996). En revanche, le niveau socio-économique des enfants dyscalculiques est légèrement plus faible que celui de la population dont ils sont issus (Gross-Tsur et coll., 1996).

V. Description des troubles et classification

A. Présentation générale des systèmes de classification

Les systèmes de classification de la dyscalculie les plus récents présentent une filiation très claire avec ceux dégagés dans le champ de la neuropsychologie des acalculies de l'adulte. Badian (1983) par exemple, reprend la classification que Hécaen, Angelergues et Houiller (1961) avaient proposée chez l'adulte et qui distinguait 3 types de troubles: l'alexie-agraphie des nombres, l'acalculie spatiale et l'anarithmétrie. A ceux-ci, Badian ajoute également la dyscalculie attentionnelle-séquentielle.

L'alexie - agraphie des nombres correspond à une difficulté dans l'écriture ou la lecture des nombres.

L'acalculie spatiale est définie comme un trouble des relations spatiales se marquant au niveau de l'alignement des nombres, la position des chiffres dans le nombre (14 pour 41) ou l'orientation des chiffres (7 écrit en miroir), etc. Dans la résolution d'opérations écrites, Badian relève plusieurs signes de dyscalculie spatiale. Ainsi, certains enfants commencent l'algorithme tantôt par la gauche tantôt par la droite. Dans les multiplications, les différents sous-produits sont écrits sans considérer les décalages spatiaux nécessaires au respect des colonnes d'unités, dizaines, centaines etc., de sorte que la somme des résultats intermédiaires n'aboutit pas au résultat correct. L'enfant peut aussi inverser le chiffre à écrire et celui à reporter (par exemple pour 4x6=24, l'enfant écrit 2 et reporte 4). En revanche, les tables d'additions et de multiplications sont bien maîtrisées.

L'anarithmétrie fait référence aux difficultés dans la conduite d'opérations arithmétiques. A ce niveau, Badian introduit une distinction entre l'anarithmétrie "vraie" et le trouble attentionnel-séquentiel. Dans le premier cas, l'enfant s'est constitué un bon réseau de faits arithmétiques et positionne correctement les nombres dans les opérations écrites mais il présente une grande confusion entre les algorithmes relevant des différentes opérations (voir encadré 1).

----

insérer l'encadré 1

Dans le type attentionnel-séquentiel par contre, l'enfant éprouve d'énormes difficultés à retenir les tables de multiplication. Les additions et les soustractions donnent également lieu à des erreurs. Des difficultés de passage d'une opération à l'autre peuvent aussi être observées (par exemple, confronté à une série d'opérations dont les premières sont des additions, l'enfant poursuit sur sa lancée sans repérer le changement d'opérateur). Dans les opérations écrites, Badian remarque que ces enfants peuvent oublier un chiffre dans la colonne de ceux à additionner, ne pas comptabiliser un report qu'ils avaient pourtant noté, ou encore, omettre à la fin d'une opération d'ajouter la virgule d'un nombre décimal. Badian fait l'hypothèse que ces enfants auraient des capacités mnésiques faibles et présenteraient souvent les caractéristiques des enfants hyperactifs avec trouble de l'attention.

Une autre classification a été proposée par Temple (1992b). Celle-ci s'inspire également des modèles développés en neuropsychologie de l'adulte et en particulier, de l'architecture proposée par McCloskey, Caramazza et Basili (1985). Elle distingue une dyscalculie du traitement numérique, une dyscalculie des faits arithmétiques et une dyscalculie procédurale. La dyscalculie du traitement numérique renvoie à des difficultés du traitement des symboles numériques ou des mots comme dans la lecture, l'écriture ou la répétition de nombres. Il s'agit donc d'une difficulté proche de l'alexie-agraphie des nombres de Badian. La dyscalculie des faits arithmétiques correspond à une difficulté dans la maîtrise des faits arithmétiques (soit les tables de multiplication, additions simples, soustractions simples ...). Ce sous-type aurait donc quelques ressemblances avec le type attentionnel-séquentiel de Badian. Enfin, la dyscalculie procédurale renvoie aux difficultés de planification et de conduite de la séquence ordonnée des opérations nécessaires à la réalisation des calculs complexes. On se trouverait donc ici dans un cas de figure proche de l'anarithmétrie vraie de Badian ou de l'acalculie spatiale.

A l'heure actuelle, nous considérons que ces typologies restent d'un intérêt très limité. En effet, d'une part, il n'existe pas de recherches contrastant ces différents sous-types de dyscalculies sur le plan des facteurs cognitifs associés ou des causes sous-jacentes. D'autre part, les profils rencontrés en clinique sont souvent moins contrastés que ne le supposent ces classifications. Ainsi, par exemple, Paul (10;7 ans) est décrit par Temple (1989) pour son alexie-agraphie des nombres mais cette difficulté est loin d'être isolée. L'auteur remarque en effet que "*no arithmetical concepts and operations had been mastered; only simple addition of numbers less than ten was sometimes possible by counting with fingers*" (p. 99). De plus, il nous semble que ces typologies ne sont pas exhaustives. En effet, beaucoup d'enfants, par exemple, consultent pour des difficultés en mathématique qui dérivent de leur incapacité à maîtriser le système en base 10[4]. Enfin, il semble que certains dyscalculiques éprouvent des difficultés dans l'activation ou la représentation même de la sémantique du nombre.

---

[4] Notre système numérique s'articule autour d'une base 10 (cinquante égale cinq fois dix) qui s'inscrit, à l'écrit en chiffre, dans un système positionnel. Ainsi, suivant sa position dans le nombre, 5 peut signifier 5 unités, 5 dizaines, 5 centaines, etc.. A chaque recul de position vers la gauche du nombre, la quantité auquel un chiffre correspond, doit être multipliée par une puissance de dix croissante (dans 125, le chiffre 5 vaut 5 x 10exp0, dans 152, le chiffre 5 vaut 5 x 10exp1; et dans 521, il vaut 5 x 10exp2, etc.).

Comme les travaux sur les difficultés d'apprentissage en mathématique ont essentiellement porté sur les troubles de la lecture et de l'écriture de nombres, et sur la résolution de calculs simples, nous détaillerons davantage ces types de difficultés dans les sections suivantes. Enfin, nous terminerons par un exposé des recherches concernant l'éventuelle difficulté au niveau de l'accès à, ou de, la représentation sémantique du nombre.

B. Difficultés dans l'écriture et la lecture des nombres

La maîtrise des codes numériques et des passages d'un code à l'autre (par exemple, la lecture à voix haute de nombres arabes) peuvent poser des problèmes spécifiques[5] et donner lieu à des erreurs particulières. Avant de préciser ces difficultés, il nous faut d'abord décrire brièvement les caractéristiques essentielles des codes numériques. Nous nous limiterons ici à ceux qui sont les plus fréquemment utilisés, soit, le code numérique verbal et le code numérique écrit en chiffres arabes.

Chacun de ces systèmes est caractérisé par un lexique et une syntaxe. Le lexique comprend des unités, appelées primitives lexicales, qui réfèrent directement à une numérosité. Le lexique du code numérique arabe comprend les dix chiffres de 0 à 9. Celui du code verbal (oral ou écrit) comporte une trentaine de primitives organisées dans des classes lexicales ordonnées: les unités (de "un" à "neuf'), les particuliers (de "onze" à "seize"), les dizaines (de "dix" à "nonante"), les multiplicateurs ("cent", "mille", etc) et enfin le "zéro". Chaque primitive peut être caractérisée par sa classe d'appartenance et la position qu'elle occupe au sein de cette classe. Ainsi, « quatorze » est la 4ième unité de la classe des particuliers.

Etant doné que l'univers des nombres est infini, on ne peut imaginer que des primitives lexicales soient disponibles pour référer à chaque numérosité. Des règles de combinaison de ces primitives lexicales sont donc nécessaires pour permettre la création de structures numériques permettant de signifier chaque numérosité. C'est ce qu'on appelle la syntaxe. Dans le code arabe, toutes les combinaisons de chiffres sont possibles et légales. Le code arabe est un système positionnel en base 10 c'est-à-dire que la quantité représentée par un chiffre varie selon sa position dans le nombre. Ainsi, 2 peut faire référence à "deux" (dans 42), à "vingt" (dans 25), à "deux cents" (dans 245) etc. La valeur d'un chiffre est entièrement déterminée par sa position (calculée à partir de la droite) dans la séquence. A chaque position en se décalant

5 Même en cas de dyslexie, la difficulté de lecture de nombres arabes ne peut se réduire à une difficulté générale de lecture. En effet, contrairement à la lecture de mots, la lecture de nombres arabes n'implique pas de processus d'assemblages reposant sur des conversions graphème-phonème. Une étude chez l'enfant tout venant a montré que la lecture des nombres et celle des mots suivaient des évolutions différentes (Seron, Van Lil et Noël, 1995).

vers la gauche, le chiffre augmente sa valeur d'une puissance de dix. La numérosité auquel le nombre fait référence correspond à la somme des quantités représentées par chaque chiffre suivant sa position dans le nombre.

Dans le code numérique verbal, les primitives lexicales peuvent se combiner suivant des relations additives (par exemple, *cent deux* = "cent" + "deux") ou multiplicatives (par exemple: *deux cents* = "deux" x "cent") ou les deux (par exemple, *trois cent vingt* = "trois" fois "cent" plus "vingt"). Toutefois, toutes les combinaisons ne sont pas légales. Ainsi, *dix-huit* est un numéral verbal correct mais *dix-deux* ne l'est pas. De la même manière *deux mille* est correct mais *vingt cents* ne l'est pas (voir Power et Longuet-Higgins, 1978, ou Hurford, 1987 pour une description détaillée de ces règles syntaxiques).

Pour évaluer la maîtrise des codes numériques, il est courant de proposer à l'enfant des tâches de transcodage, soit, des épreuves impliquant le passage d'un code numérique à un autre. Il peut s'agir de la lecture à voix haute de nombres arabes (soit, le passage du code arabe au code verbal oral) ou encore, de l'écriture de nombres arabes sous dictée (soit le passage du code verbal oral au code arabe). Les erreurs produites dans ces tâches sont essentiellement de deux types: des erreurs lexicales et des erreurs syntaxiques (pour une revue plus exhaustive du sujet, voir Noël & Turconi, 1999 ; Noël 2001a; Lochy & Censabella, à paraître). Grossièrement, les erreurs lexicales touchent une unité lexicale du nombre sans modifier de manière radicale le gabarit du nombre. Les erreurs syntaxiques, par contre, touchent les relations entre les primitives lexicales et entraînent une modification du gabarit du nombre (par exemple, /vingt-sept/ écrit 207, /trois cents/ écrit 3100, ...). Au cours du développement normal, les erreurs lexicales sont observées dans le courant de la première année (CP) mais disparaissent quasi totalement dès l'année suivante. Celles-ci peuvent porter uniquement sur un traitement erroné de la position dans la classe lexicale (par exemple, <u>9</u>03 lu /<u>six</u> cent trois/: le "six" émis appartient bien à la classe des unités mais il y occupe la sixème position et non la neuivème) ou bien résulter d'un traitement incorrect de l'information de classe elle-même (par exemple, 14 est lu /quarante/, 4<u>30</u> est lu /quatre cent <u>treize</u>/), ce qui peut parfois modifier légèrement (par une puissance de dix) le gabarit du nombre (par exemple, /quinze mille/ écrit 5.000). Il n'est pas toujours aisé de distinguer les erreurs de classe des erreurs syntaxiques. Toutefois, l'observation répétée de ce type d'erreurs dans des structures syntaxiques variées peut aider au diagnostic différentiel (par exemple, rencontrer également ce type d'erreurs dans des structures simples comme /quatorze/ écrit 4). Si ces erreurs lexicales disparaissent très rapidement au cours de l'apprentissage scolaire, les erreurs syntaxiques, sont en revanche plus nombreuses et persistent jusqu'en fin de 3^{ième} année pour les structures à 5 chiffres. Les erreurs syntaxiques sont variées (par exemple, confusion entre une relation additive et multiplicative: /cent deux/ écrit 200, difficulté de gérer l'opération de surécriture dans le code arabe lorsque des primitives entretiennent des relations additives: /cent vingt/ écrit 10020; difficulté de maîtriser les relations multiplicatives: /trois cents/ écrit 3 100; ou autres: 305 lu /trente cinq/, 2100 lu /deux cents/, …).

Chez l'enfant en difficulté d'apprentissage mathématique, des erreurs lexicales peuvent être rencontrées (voir le cas de Paul, décrit par Temple, 1989, encadré 2) mais les erreurs syntaxiques sont plus fréquentes (voir par exemple, le cas CM décrit par Sullivan, Macaruso & Sokol, 1996, encadré 2). Le travail du thérapeute consistera alors à identifier la nature des erreurs produites et à cibler le processus cognitif responsable de celles-ci. Ainsi, une lecture erronée de nombres arabes peut provenir d'une difficulté de compréhension des nombres arabes ou bien d'une difficulté de production des nombres verbaux oraux. L'observation d'erreurs apparentées dans des taches n'impliquant qu'un seul code numérique (par exemple, la comparaison de deux nombres arabes, ou bien, le positionnement d'un nombre arabe sur une échelle graduée , pour évaluer la compréhension des nombres arabes) permettra de préciser le lieu du dysfonctionnement.

----

insérer l'encadré 2

Avant de cloturer cette section, nous aimerions également signaler que certaines difficultés dans l'apprentissage des codes numériques peuvent résulter de déficits non spécifiques à ce domaine. Par exemple, les enfants dysphasiques pour qui le développement langagier pose problème, sont également en difficulté lorsqu'il s'agit d'apprendre le lexique numérique. A 5 ans, leur comptage est d'un niveau moindre que celui d'enfants témoins du même âge (Fazio, 1994) et l'extension de la chaîne numérique verbale est anormalement lente (Fazio, 1996). En revanche, leur maîtrise du code arabe excède le niveau escompté sur base de leurs compétences verbales et est comparable à celles d'enfants du même âge chronologique (Donlan & Gourlay, 1999). L'examen du traitement numérique et son interprétation ne peuvent donc être dissociés d'une vue plus globale du système cognitif de l'enfant.

C. Difficultés de calculs

Les difficultés de calculs s'observent déjà dans des tâches de résolution d'opérations simples impliquant des nombres à un chiffre (par exemple, 9+4, 8x7). Dans ce type de situations, des différences quantitatives et qualitatives apparaissent entre les enfants dyscalculiques et les enfants témoins. Ainsi, les enfants dyscalculiques produisent plus d'erreurs, sont plus lents et utilisent des stratégies de résolution moins matures que leurs pairs (Fleischner, Garnett & Shepard, 1982; Geary, Widaman, Little & Cormier, 1987; Geary, 1990; Geary, Brown & Samaranayake, 1991).

Au cours du développement normal, l'enfant utilise des stratégies variées pour résoudre des opérations arithmétiques. Dans le cas de l'addition, par exemple, diverses stratégies de comptage sont utilisées par l'enfant. Celles-ci se distinguent suivant le type de support utilisé (comptage des objets, comptage sur les doigts, comptage verbal uniquement) ou la procédure employée (<u>comptage du tout</u>, soit un comptage à partir de 1 pour chacun des termes [par exemple, pour réaliser 3 + 5 , je compte 1,2,3,4,5,6,7,8], <u>comptage max</u> ou comptage à partir du premier terme [par exemple, 3+5= 4,5,6,7,8] et <u>comptage min</u>, soit, à partir du plus grand terme [par exemple, 3+5=6,7,8]). En outre, l'enfant peut aussi recourir à la simple <u>récupération en mémoire</u> de la réponse. La mémorisation des réponses apparaît d'abord pour les calculs avec une petite somme et pour les doubles (soit, les additions de deux termes égaux, comme 4+4). La mémorisation de certains faits permet aussi la mise en place de stratégies de <u>décomposition</u> qui réduisent fortement le nombre de pas de comptage (par exemple, s'il connaît la réponse à 3+3, l'enfant peut résoudre 3+4 par 3+3+1). Bien que certaines stratégies soient clairement plus efficaces et rapides que d'autres, le développement ne suit pas une évolution en stade dans laquelle une stratégie peu mature serait abandonnée au profit d'une autre plus mature. Au contraire, à chaque moment, l'enfant dispose d'une palette de stratégies différentes dans lesquelles les plus efficaces sont de plus en plus favorisées aux dépens des moins matures (Siegler, 1987).

Les stratégies utilisées par les enfants dyscalculiques sont peu matures. Par exemple, ils utilisent majoritairement la stratégie du comptage du tout quand les autres enfants comptent à partir du premier ou du plus grand terme et ont encore recours à des procédures de comptage quand leurs compagnons récupèrent la solution en mémoire à long terme (Geary, 1990). Ils produisent également plus d'erreurs, et ce, tant dans les procédures de comptage que dans la récupération. Le choix de la stratégie utilisée ne semble pas non plus optimal. En effet, pour résoudre un problème donné, ces enfants optent parfois pour des stratégies qui les conduisent à produire beaucoup d'erreurs. Par exemple, ils peuvent résoudre des additions par récupération en mémoire de la réponse alors que très souvent, cette stratégie les amène à produire une erreur. Ou encore, ils peuvent utiliser des stratégies de comptage même pour résoudre des problèmes pour lesquels ils connaissent la réponse en mémoire. Enfin, les temps de réponse suivent un profil atypique. Ainsi, et contrairement aux observations réalisées chez des écoliers témoins, le temps de récupération d'une réponse en mémoire n'est que faiblement prédit par la somme des deux termes du problème. Par ailleurs, un suivi longitudinal de ces enfants montre que progressivement, ils mettent en œuvre des stratégies de comptage de plus en plus matures, qu'ils diminuent leur taux d'erreurs et l'efficacité de leurs stratégies de comptage mais qu'en revanche, leur taux de récupération de la réponse en mémoire à long terme reste invariablement bas (Geary, Brown & Samaranayake, 1991).

D. Difficultés au niveau de la représentation sémantique du nombre

Outre ces difficultés dans le transcodage ou les calculs, il semble que la représentation sémantique du nombre puisse être atypique chez certains enfants dyscalculiques. Mais qu'est-ce que la sémantique d'un nombre ? Les nombres peuvent être rencontrés dans des situations diverses (Fuson, 1992). Dans des contextes non-numériques, ils peuvent servir d'étiquette (par exemple, je prends le bus 72 et je regarde la chaîne AB3 tous les soirs). Dans des contextes numériques, ils peuvent exprimer l'ordinalité (j'étais le premier) ou bien la cardinalité (il y a 15 marqueurs dans mon plumier). Ce dernier aspect est primordial et constitue réellement le cœur de la sémantique numérique. Le nombre sert en effet à quantifier un nombre d'éléments (j'ai cinq doigts à une main) ou d'évènements (j'ai sauté trois fois) ou encore un nombre d'unités de mesure (il y a 3 m de ruban). Cette quantification permet aussi de comparer des ensembles (Jules a 7 pommes et Paul en a 3, donc Jules a plus de pommes que Paul), de décomposer des ensembles (j'ai 3 tartines, j'en mangerai 1 ce matin et 2 ce midi) ou de combiner des ensembles (tu as 2 billes et moi j'en ai 4, ensemble on en a 6). Cette représentation de la magnitude du nombre (c'est-à-dire, de la quantité à laquelle il réfère) est donc tout à fait primordiale.

Selon Butterworth (1999), une représentation anormale de la magnitude numérique pourrait être à la base de la dyscalculie. Pour illustrer son propos, il décrit le cas de Charles, un étudiant universitaire. Bien qu'ayant un niveau intellectuel absolument normal, celui-ci se plaignait de lacunes importantes en mathématique: il comptait sur ses doigts pour réaliser des calculs simples, les calculs complexes étaient très laborieux, et lorsqu'il faisait ses courses, il lui était difficile de comparer les prix ou de vérifier la monnaie qui lui était rendue. Selon Butterworth, les problèmes de Charles sont dus à une représentation anormale de la magnitude du nombre. En effet, lorsqu'on soumet cet étudiant à une paire de chiffres et qu'il doit sélectionner le plus grand des deux (tâche classiquement utilisée pour tester la représentation sémantique du nombre), ses temps de réponse sont quatre fois plus longs que ceux des sujets contrôles et il montre un effet de distance inverse: au lieu d'être plus rapide pour la comparaison de chiffres numériquement éloignés que pour celle de nombres proches (comme, 3-8 versus 3-4), il est plus lent. Une analyse de son comportement indique qu'il compte sur ses doigts pour réaliser la tâche. Il apparaît donc qu'en amont de ses problèmes de calcul, Charles soit handicapé dans les traitements de base impliquant la représentation de la quantité elle-même. Une conclusion similaire est tirée par Ta'ir, Brezner et Ariel (1997) pour un enfant dyscalculique de 11 ans.

Dans la pratique clinique, ce type de difficultés est extrêmement rare. Toutefois, une étude exploratoire que nous avons menée (Noël, 2002), suggère que l'accès à la représentation sémantique des nombres symboliques pourrait être moins aisée pour les enfants dyscalculiques que pour des enfants témoins du même âge. Dans cette étude, 25 enfants dyscalculiques (âge moyen: 8 ans 4 mois) et 25 sujets témoins (âge moyen: 8 ans 3 mois) ont été soumis à deux tâches de comparaison numérique impliquant des quantités de 1 à 9. Dans la première, deux collections de points noirs étaient présentées à l'enfant qui devait pointer celle qui en comportait le plus. Aucune différence n'est apparue entre les deux groupes d'enfants pour cette tâche et ce, aussi bien dans les analyses de temps de réponse que dans celles des taux d'erreurs. Dans la seconde condition, une paire de chiffres arabes était présentée à l'enfant qui devait pointer vers le plus grand numériquement. Cette situation a donné lieu à des performances différentes entre les deux groupes[6]. Ainsi, malgré l'exclusion de deux sujets dyscalculiques ayant produit trop d'erreurs (37% et 56%), le groupe des 23 enfants dyscalculiques produit significativement plus d'erreurs que les sujets témoins (t(46)=-2,31, p=0,025). Cette différence entre les groupes apparaît surtout pour les paires constituées de grands nombres (soit, les chiffres entre 5 et 9: $X^2_{(1)}$=5,17, p=0,023; alors que pour les paires constituées des chiffres entre 1 et 5, la différence n'est que marginalement significative: $X^2_{(1)}$=3,45, p=0,063). Au niveau des temps de réponse, les deux groupes présentent des vitesses comparables. Toutefois, l'effet de distance classique indiquant un allongement des temps de réponse avec la proximité numérique des nombres constituant la paire ($F_{(1,46)}$=20,26, p<0,0001) interagit avec le facteur Groupe ($F_{(1,46)}$=5,16, p<0,03): les enfants dyscalculiques présentent une plus grande sensibilité à l'effet de distance numérique que les sujets contrôles et sont davantage ralentis lorsque les paires de chiffres à comparer sont numériquement proches (voir figure 1).

----

insérer la figure 1

En résumé, les difficultés éprouvées par les enfants dyscalculiques peuvent concerner la maîtrise des systèmes symboliques du nombres, les processus de calculs (et ce, tant au niveau del'acquisition de connaissances déclaratives, comme les faits arithmétiques, que de connaissances procédurales, voire même la représentation sémantique du nombre.

VI. Facteurs associés ou causaux

Trois types d'hypothèses sont actuellement envisagées pour rendre compte de l'apparition de difficultés majeures dans l'apprentissage des nombres. La première suppose qu'un facteur héréditaire contribuerait à l'apparition de dyscalculies. La seconde tente de mettre en évidence une immaturité ou des particularités au niveau de la structure et/ou du fonctionnement des aires corticales classiquement impliquées dans le traitement numérique. La troisième enfin suppose que ces difficultés découleraient de faiblesses au niveau de processus cognitifs généraux comme des capacités limitées de mémoire de travail ou d'inhibition. Ces pistes qui relèvent de niveaux d'analyse différents, ne sont nullement exclusives mutuellement.

A. Hypothèse génétique

Plusieurs éléments de la littérature suggèrent la possibilité d'une contribution génétique à la dyscalculie. Premièrement, les études épidémiologiques de Gross-Tsur, Manor et Shalev (1996) soulignent la présence de difficultés d'apprentissage en mathématique dans la parentée au premier degré des enfants dyscalculiques. Cette présence familiale de troubles d'apprentissage des mathématiques serait également liée à une plus grande probabilité de persistance du trouble trois ans plus tard (Shalev, Manor, Awerbach & Gross-Tsur, 1998). Par ailleurs, il existe plusieurs anomalies génétiques qui sont connues pour entraîner des difficultés dans l'apprentissage mathématique, en particulier, le syndrome X-fragile (Grigsby, Kemper & Hagerman , 1987), le syndrome de Williams (Paterson et coll., 1999) et le syndrome de Turner

---

[6] Ces différences ne peuvent pas s'expliquer par une méconnaissance de certains chiffres par les enfants dyscalculiques puisque les deux groupes d'enfants obtiennent des performances

(Rovet, Szekely & Hockenberry, 1994; Temple & Marriott, 1998; Bruandet et coll.; 2004). Toutefois, l'hypothèse d'une héritabilité de la dyscalculie n'a fait l'objet, à notre connaissance, que d'une seule recherche. Dans celle-ci, Alarcon, DeFries, Light, and Pennington (1997) ont étudié un échantillon de 40 paires de jumeaux homozygotes (HoZ) et 23 hétérozygotes de même sexe (HeZ) dont un des membres au moins souffrait de dyscalculie (plus un groupe contrôle de 167 paires de jumeaux HoZ et HeZ sans troubles d'apprentissage). Il est apparu que le taux de concordance de dyscalculie était plus important dans les paires HoZ (0,73) que dans les paires HeZ (0,56), bien que la différence n'atteigne pas le seuil de signification conventionnel. Si la même analyse est conduite sur la sous-population des enfants qui présentent une difficulté en mathématique sans problèmes de lecture, la différence de taux de concordance est plus nette (0,85 et 0,46) mais n'atteint toujours pas le seuil de signification conventionnel (p=0,08). En résumé, l'hypothèse d'un certain degré d'héritabilité de la dyscalculie semble plausible mais manque encore d'arguments empiriques convaincants.

B. Hypothèse neurobiologique

Pour d'autres auteurs, les difficultés d'apprentissage en mathématique seraient liées à des mécanismes cérébraux immatures ou dysfonctionnels. Les premières recherches de ce type ont été menées par Rourke et ses collègues (Rourke, 1989, 1993; Rourke & Conway, 1997). Ces auteurs ont administré de larges batteries neuropsychologiques à des enfants présentant ou non des difficultés d'apprentissage en mathématique. Parmi les premiers, une distinction était introduite entre ceux qui éprouvaient ou non une difficulté d'apprentissage en lecture (respectivement, groupe dyscalculie-dyslexie et groupe dyscalculie). Des profils neuropsychologiques distincts ont été dégagés pour ces deux types d'enfants. Ainsi, le groupe dyscalculie présentait des performances inférieures à celles du groupe dyscalculie-dyslexie (et à un groupe contrôle) dans les tâches psychomotrices complexes et perceptivo-tactiles, surtout en ce qui concerne celles impliquant la main gauche. Des difficultés étaient également observées dans les tâches d'organisation visuo-spatiale. Pour les auteurs, ce profil est le signe d'une déficience de l'hémisphère droit et les problèmes d'apprentissage en mathématique de ces enfants résulteraient de difficultés dans le raisonnement non-verbal et les traitements visuo-spatiaux. Le groupe dyscalculie-dyslexie, en revanche, réalisait correctement ces tâches mais éprouvait des difficultés dans les traitements verbaux (mémoire verbale, perception auditive, associations

---

similaires en écriture et en lecture des chiffres de 1 à 9.

verbales, …), ce qui ne posait pas de problème au groupe dyscalculie. Ce profil est interprété en termes d'un dysfonctionnement de l'hémisphère gauche. Les difficultés en mathématique seraient alors la conséquence d'un trouble verbal plus général. Selon Rourke et Conway (1997), ces deux profils pourraient également correspondre à des types différents de dyscalculies. Ainsi, les enfants du groupe dyscalculie-dyslexie montreraient davantage de signes d'agraphie-alexie des nombres ou encore des difficultés au niveau des faits arithmétiques. Les enfants du groupe dyscalculie, par contre, relèveraient plus du sous-type de la dyscalculie spatiale ou montreraient des lacunes dans la résolution de problèmes, le raisonnement et la formation de concepts (pour une perspective similaire, voir Spiers, 1987).

D'autres recherches ont mis de côté les différences hémisphériques pour s'intéresser à des régions cérébrales plus spécifiques, en particulier le lobe pariétal. L'intérêt pour cette région cérébrale date de 1940 lorsque Gerstmann a décrit des patients adultes chez qui l'acalculie acquise s'accompagnait d'une agnosie digitale (incapacité à identifier, sans la vue, le doigt qui vient d'être touché), d'une confusion gauche-droite et d'une dysgraphie (trouble de la formation graphique des lettres suite à un manque de coordination des gestes nécessaires à l'écriture). Selon l'auteur, la présence de cette tétrade de symptômes, connue depuis lors sous le nom de syndrome de Gerstmann[7], signerait la présence d'une lésion pariétale de l'hémisphère dominant touchant plus précisément le gyrus angulaire. Depuis lors, le rôle important du gyrus angulaire dans le traitement numérique, ainsi que d'autres régions proches (comme le sillon intra-pariétal) a été largement démontré dans les études d'imagerie cérébrale menées chez l'adulte sain (pour une revue, voir Zago & Pesenti, 2002).

Chez l'enfant, des cas de syndrome de Gerstmann ont également été rapportés (voir Kinsbourne & Warrington, 1963 ; Grigsby, Kemper & Hagermann, 1987 ; Suresh & Sebastian, 2000). Ces descriptions restent malheureusement très anecdotiques et peu informatives sur le plan théorique.

Récemment, ce syndrome a été remis au goût du jour par Fayol, Barrouillet et Marinthe (1998). Ces chercheurs français se sont inspirés des symptômes associés à la dyscalculie en vue d'identifier de bons prédicteurs des compétences numériques chez l'enfant tout-venant. Dans une première étude, ils ont montré qu'un test neuropsychologique, évaluant entre autre les gnosies et la discrimination digitale[8], administré en fin de maternelle prédisait mieux les capacités numériques mesurées un an plus tard que les scores obtenus en fin de maternelle à une épreuve de développement global (une tâche de dessin d'un losange et d'un bonhomme). En effet, une analyse de régression montre que 22% de la variance des résultats obtenus au test mathématique sont expliqués par le test neuropsychologique digital et que seulement 10% de plus sont expliqués lorsqu'on introduit les scores obtenus au test de développement global.

Dans une seconde étude, les mêmes auteurs (Marinthe, Fayol & Barrouillet, 2001) reprennent une partie de l'échantillon initial d'enfants et montrent que les capacités au test digital restent un prédicteur significatif des performances scolaires en mathématique trois ans plus tard, soit quand les enfants sont âgés de 8 ans (r=0,25). De plus, cette corrélation est plus élevée que celle calculée entre les résultats en mathématique et les scores obtenus à 8 ans à une épreuve d'intelligence non verbale (matrices progressives couleur, Raven et coll., 1998, r=0,17, ns). En revanche, cette dernière épreuve prédit mieux les performances scolaires en français que le test digital (respectivement, r= 0,23 et r = 0,19, ns).

Enfin, dans une troisième étude, Marinthe, Fayol et Barrouillet (1999) montrent que les performances à une tâche d'appariement intermodal visuo-tactile, qui est également supposée sous-tendue par le cortex pariétal, corrèle avec les performances numériques dans un échantillon délèves de maternelle (5 ans 8 mois, r=0,54).

Ces premiers travaux nous semblent avoir une importance majeure dans le sens où ils identifient peut-être des indicateurs précoces de la dyscalculie. Toutefois, deux critiques méritent d'être soulevées. Premièrement, les tests digitaux utilisés exigeaient en réalité des traitements

---

[7] Le statut de syndrôme a été critiqué par Benton (1987) qui rapporte des cas de patients présentant trois des signes (le triplet en question pouvant différer selon les individus), et non les quatre.

[8] Ce test comprenait des épreuves de gnosies digitales (l'expérimentateur touche un doigt de l'enfant alors qu'il a les yeux clos, ce dernier doit ensuite indiquer le doigt touché), de discrimination digitale (même exercice mais cette fois, deux doigts sont touchés successivement), de simultagnosie (l'examinateur touche simultanément deux parties du corps de l'enfant - par exemple , l'épaule gauche et l'oreille droite - alors que celui-ci garde les yeux fermés. L'enfant doit ensuite pointer les parties du corps stimulées), et de graphestésie (alors que l'enfant a les yeux clos, l'experimentateur dessine une forme simple sur le dos de la main de l'enfant qui doit déterminer la forme dessinée).

numériques qui ne sont pas anodins pour un enfant de maternelle[9]. On peut dès lors craindre une certaine circularité dans le fait de prouver que la réussite à ce type d'épreuves prédit les scores obtenus ultérieurement dans des tâches numériques.

D'autre part, pour conclure que les symptômes du syndrome de Gerstmann constituent un prédicteur spécifique des performances numériques, il faudrait montrer qu'ils prédisent mieux les performances dans des tâches numériques que dans des tâches non numériques (ce qui a été observé dans l'étude 2) et qu'ils sont un meilleur prédicteur des résultats en mathématique que d'autres tests de développement cognitif global. Les tests de développement cognitif utilisés par ces auteurs sont des épreuves de dessin ou de raisonnement visuo-spatial. Or un dysfonctionnement du cortex pariétal peut donner lieu à des difficultés de traitement visuo-spatial qui se marqueront entre autres, dans les activités de dessin. Chez l'enfant, Kinsbourne et coll. (1963) suggèrent même d'associer l'apraxie constructive aux 4 autres signes du syndrome de Gerstmann. Fayol et coll. (1998) eux-mêmes obtiennent des corrélations très proches entre d'une part le test de calcul et d'autre le test digital ou celui de dessin (respectivement, $r=0,46$ et $r=0,44$).

L'autre question importante concerne l'interprétation que l'on peut donner à ces résultats. Marinthe et coll (1999) repèrent deux interprétations théoriques dans la littérature. Selon la première, défendue entre autres par Benton (1987), l'association des signes de Gerstmann provient de la proximité cérébrale des aires régissant les fonctions cognitives sous-jacentes. En d'autres termes, les gnosies digitales et autres signes de Gerstmann sont un bon prédicteur des performances arithmétiques parce que tous ces traitements sont supportés par des régions voisines au niveau du lobe pariétal. L'association de troubles serait donc fortuite sur le plan fonctionnel. La seconde interprétation en revanche, pose l'hypothèse d'un lien de causalité entre agnosie digitale et difficultés d'apprentissage en mathématique. En particulier, Butterworth (1999) souligne le rôle crucial des doigts (et de leurs représentations) dans le développement mathématique et ce, aussi bien au niveau du dénombrement (par le pointage des objets), de la représentation de la quantité (par le rôle de collection-témoin) ou des algorithmes de comptage dans la réalisation des additions et des soustractions. Une représentation digitale déficitaire pourrait donc perturber plusieurs acquisitions numériques.

---

[9] Ainsi, dans le test de graphestésie, parmi les 5 formes à reconnaître, on note trois chiffres (1,6,3) et pour le test de gnosie digitale, un nombre est attribué à chaque doigt de la main et l'enfant doit produire oralement ce nombre lorsque son doigt est touché alors qu'il garde les yeux fermés.

L'étude que nous avons menée visait à répondre aux deux questions soulevées ci-dessus. Premièrement, les symptômes du syndrome de Gerstmann constituent-ils des prédicteurs spécifiques des capacités numériques ? Deuxièmement, l'association entre performances aux tests de gnosies digitales et aux tests numériques reflète-t-elle une association anatomique (proximité géographique des zones cérébrales impliquées dans les processus mis en jeu) ou (également) une association fonctionnelle (le développement numérique reposant sur des représentations digitales) ?

L'étude que nous avons menée portait sur un groupe de 44 enfants. Ceux-ci étaient testés en début de première primaire (CP) et une année plus tard. Lors du premier bilan, deux types d'épreuves étaient administrés: les premières visaient à évaluer la présence de symptômes du syndrome de Gerstmann (les gnosies digitales et l'orientation gauche-droite), les secondes constituaient des mesures de développement global (une mesure de la vitesse de traitement [le sous-test des codes de la WISC] et un test de développement de la préférence manuelle (Bishop et coll., 1996)). L'année suivante, les performances de ces enfants étaient évaluées dans des tâches numériques, une tâche de construction évaluant les praxies constructives (le test des cubes de la WISC) et une épreuve de lecture de mots isolés. Cet ensemble d'épreuves était sélectionné pour répondre à la première question. En effet, si les symptômes du syndrome de Gerstmann constituent un prédicteur relativement spécifique des traitements numériques, nous devrions observer une corrélation entre les mesures de gnosie digitale et d'orientation gauche-droite du premier bilan et les scores dans les tâches numériques un an plus tard. Une corrélation significative pourrait également être obtenue avec l'épreuve de construction mais pas avec celle de lecture. En revanche, des mesures plus générales de développement devraient être de moins bons prédicteur des scores mathématiques et montrer peu de différence dans leurs corrélations avec les épreuves de mathématique ou de lecture.

Les résultats obtenus soutiennent largement ces prédictions. Les deux épreuves liées aux symptômes de Gerstmann testés lors de la première évaluation (gnosie digitale et orientation gauche-droite) constituent de bons prédicteurs des performances mesurées un an plus tard dans les tâches numériques (corrélations de 0,46 et 0,39, respectivement) et dans les tâches de construction (corrélations de 0,41 et 0,34). En revanche, ces deux tests ne prédisent pas les performances en lecture. Enfin, les mesures de développement général (vitesse de traitement et préférence manuelle) ne prédisent pas de manière significative les scores aux autres tests réalisés lors de la seconde évaluation. En conclusion, les performances obtenues à des épreuves mesurant les symptômes de Gerstmann sont des prédicteurs relativement spécifiques du traitement numérique et des autres signes associés à ce syndrome.

Concernant notre seconde question, nous avons contrasté des épreuves numériques qui, suivant le modèle anatomo-fonctionnel de Dehaene et Cohen (1995) faisaient appel aux représentations numériques soutenues par le cortex pariétal (comparaisons de la grandeur numérique, subitizing[10]) et d'autres qui le faisaient moins (écriture de nombres sous dictée). Suivant l'hypothèse d'une proximité anatomique, les signes de Gerstmann devraient mieux prédire les premières activités que les secondes. D'autre part, nous avons aussi distingué les épreuves fortement soutenues par des représentations digitales (en particulier, résolution de petites additions, déterminer le nombre de doigts levés sur une main) de celles qui en sont indépendantes (écriture des nombres sous dictée, subitizing). Suivant l'hypothèse d'un lien fonctionnel, les gnosies digitales devraient surtout prédire les activités du premier type.

Les résultats obtenus n'ont malheureusement pas permis de trancher en faveur de l'une ou l'autre hypothèse. En effet, il est apparu que les signes de Gerstmann prédisaient de manière assez équivalente l'ensemble des tâches numériques proposées. Il est toutefois possible que ce manque de discriminabilité soit en faveur de l'hypothèse localisationniste. En effet, les prédictions que nous avions émises étaient directement basées sur les postulats du modèle anatomo-fonctionnel de Dehaene. Or, les études d'imagerie cérébrale réalisées au cours des dix dernières années ont montré que tous les traitements numériques provoquaient une activité importante au niveau de la région pariétale supérieure (pour une revue, voir Zago & Pesenti, 2002) et que la simple présentation d'un nombre suffisait à activer cette zone cérébrale (Eger et coll., 2003).

Plus récemment, le rôle important du cortex pariétal dans la dyscalculie développementale a été objectivé par Isaacs, Edmonds, Lucas, & Gadian (2001). Ces auteurs ont comparé deux groupes d'adolescents anciens prématurés suivant qu'ils présentaient ou non des résultats en calcul inférieurs à ce qui était attendu sur base de leur niveau d'intelligence. Une imagerie par résonance magnétique structurelle pratiquée chez ces sujets a montré qu'une seule région distinguait les deux populations. En effet, les adolescents du groupe faible en mathématique présentaient une densité de matière grise inférieure à celle des individus du groupe contrôle au niveau du sillon intrapariétal gauche uniquement.

Une seconde étude réalisée sur une autre population d'individus faibles en mathématique aboutit à des conclusions très similaires. Dans celle-ci, Molko et coll. (2003) comparent des

---

[10] Le subitizing fait référence à la perception immédiate et précise des petites quantités de 1 à 4 ou 5 éléments dans une collection. Cette appréhension quasi instantanée de la numérosité ne

adultes porteurs du syndrôme de Turner (trouble génétique lié à une délétion totale ou partielle d'un des chromosome X) à des sujets contrôles. Une résonance magnétique structurelle met en évidence des altérations structurales au niveau du sillon intrapariétal droit (longueur, profondeur et organisation des sillons atypique) dans le cas des individus porteurs du syndrome de Turner. En outre, une tâche de calcul exact et approximatif montre une modulation anormale de l'activation de ces zones en fonction de la taille des nombres impliqués.

L'ensemble de ces travaux soulignent donc l'importance de l'intégrité anatomico-fonctionnelle du lobe pariétal dans le développement numérique.

C. Hypothèse d'un déficit au niveau de facteurs cognitifs généraux

La troisième piste suivie dans la recherche des causes possibles de la dyscalculie développementale consiste à examiner la mesure dans laquelle un déficit au niveau de mécanismes cognitifs généraux pourrait en partie expliquer les difficultés d'apprentissage en mathématique. Ces recherches se sont plus particulièrement intéressées aux capacités de mémoire de travail et d'inhibition.

C.1. Mémoire de travail et dyscalculie

La mémoire de travail est une composante cognitive extrêmement importante qui intervient dans de nombreux processus de traitement de l'information. Dans le domaine numérique, son implication est nette chez l'adulte dans les calculs simples et complexes (Ashcraft, Donley, Halas & Vakali, 1992; De Rammelaere, Stuyven & Vandierendonck, 1999, 2001; De Rammelaere & Vandierendonck, 2001; Füsrt & Hitch, 2000; Hecht, 2002; Logie, Gilhooly & Wynn, 1994; Noël, Désert, Aubrun & Seron, 2001). Chez l'enfant, la réussite d'une opération arithmétique est également contrainte par les capacités mnésiques (Klein & Bisanz, 2000; Adams & Hitch, 1998). Etant donné ces observations, une série de recherches a mis à l'épreuve l'hypothèse d'un déficit des capacités de mémoire de travail dans le chef des enfants dyscalculiques (pour une revue détaillée, voir Noël, 2001b). Les études les plus récentes en la matière distinguent les enfants dyscalculiques selon qu'ils présentent ou non des difficultés en lecture. En effet, la dyslexie est souvent associée à des capacités mnésiques faibles. Etant donné l'association fréquente entre

---

nécessite pas un processus de comptage.

dyscalculie et dyslexie, il est important de déterminer si les aptitudes mnésiques caractérisent tous les enfants dyscalculiques ou seulement ceux qui présentent aussi un retard de lecture. Trois études seront rapportées ici: celle de Geary, Hoard et Hamson (1999), celle de McLean et Hitch (1999) et enfin, celle de Noël et Verstraete (en préparation).

Geary et coll. (1999) ont comparé les capacités mnésiques de quatre groupes d'enfants: des enfants présentant des scores normaux dans des tests de mathématique et de lecture, des enfants présentant des scores bas (c'est-à-dire inférieurs au percentile 30) à ces deux tests, et d'autres éprouvant des difficultés isolées soit en lecture, soit en mathématique. Aucune différence significative entre les groupes n'a été obtenue au niveau de l'empan de chiffres en ordre direct (mesure de la boucle phonologique). Au niveau de l'empan de chiffres en ordre inverse (mesure de l'administrateur central) par contre, les enfants présentant des difficultés en mathématique et en lecture ont obtenu des scores plus faibles que ceux des trois autres groupes.

McLean et Hitch (1999) se sont intéressés aux enfants présentant des difficultés d'apprentissage isolées en mathématique et les ont comparé à des sujets témoins de même âge chronologique (9 ans) ou à des enfants plus jeunes mais de même niveau mathématique (7 ans 11 mois). Ces trois groupes d'individus ont été soumis à une batterie de tests évaluant les capacités de la boucle phonologique, du calepin visuo-spatial et les différentes fonctions de l'administrateur central (flexibilité, attention sélective, maintien et manipulation d'informations issues de la mémoire à long terme). Il apparaît que le groupe des enfants dyscalculiques ne se distingue pas du groupe des enfants plus jeunes appariés selon le niveau en calcul. Toutefois, lorsqu'on les compare aux enfants témoins de même âge chronologique, ils présentent des scores faibles à une mesure sur deux de la boucle phonologique (répétition de non-mots mais pas empan de chiffres en ordre direct) et à une mesure sur deux du calepin visuo-spatial (blocs de Corsi[11] mais pas test des matrices (Wilson, Scott & Power, 1987)). Enfin, les différences les plus nettes apparaissent au niveau des mesures d'administrateur central (à l'exception de la mesure d'attention sélective). L'interprétation de ces résultats est cependant moins évidente. En effet, une majorité de ces épreuves font appel à des traitements numériques. Ainsi, le complètement d'additions (par exemple, " 2+3 = 4+ ? = ? ") ou l'empan d'additions (8 + 1, 21 + 7, 122 + 3…) impliquent du calcul, alors que les "trails tests" [dans lesquels l'enfant doit relier dans l'ordre alternativement un chiffre puis une lettre (1-a-2-b-3-c …)] exigent une connaissance de la chaîne numérique verbale. Etant donné qu'on ne peut exclure une difficulté dans ces opérations chez les

[11] Ce dernier résultat ne sera toutefois pas confirmé par l'étude de Bull, Johnston et Roy (1999) puisque ces auteurs n'obtiennent pas de corrélation significative entre la performance au test de Corsi et les scores en mathématique.

enfants faibles en mathématique, des scores bas dans ces épreuves ne signifient pas nécessairement un défaut de l'administrateur central lui-même.

En réponse à cette critique, Noël et Verstraete (en préparation) ont mené une étude sur un groupe de 24 enfants dyscalculiques (âge: 8 ans et 4 mois) dont la moitié présentait un retard de lecture. Ces enfants, ainsi que des enfants témoins du même âge chronologique (8 ans et 3 mois) ont été soumis à une mesure des capacités de la boucle phonologique (empan de chiffres en ordre direct) et quatre mesures des capacités de l'administrateur central. Parmi ces mesures, deux impliquaient du matériel numérique (empan de chiffres en ordre inverse et empan de comptage[12]) et les deux autres portaient sur un matériel non-numérique (empan de phrases à compléter[13] et catégospan[14]). Il s'est avéré que les deux groupes d'enfants dyscalculiques présentaient des capacités inférieures aux sujets témoins dans les deux tâches mnésiques numériques mais aussi, bien que dans une moindre mesure, dans l'empan de phrases (les résultats sont présentés dans la table 1). En revanche, aucune différence n'a été observée pour le catégospan et l'empan de chiffres en ordre direct.

----

insérer la table 1

Des résultats similaires ont été obtenus par Passolunghi et Siegel (2001). Ces auteurs contrastent également des mesures de mémoire de travail impliquant du matériel numérique (empan de chiffres en ordre direct et en ordre inverse, empan de comptage) ou non (empans de mots en ordre direct et en ordre inverse, empan de phrases à juger[15], empan de phrases à compléter, empan d'animaux[16]) et observent des capacités mnésiques plus faibles chez les sujets mauvais en résolution de problèmes, dans toutes les tâches, sauf les empans de mots (en ordre direct et en ordre inverse).

---

12 Des planches sur lesquelles sont dessinés des points bleus et jaunes sont présentées à l'enfant; celui-ci compte les points jaunes et doit, à la fin de la série de planches, rappeler dans l'ordre le cardinal de chaque planche.

13 Une série de phrases est lue à l'enfant qui les complète en donnant le dernier mot manquant. L'enfant doit ensuite répéter dans l'ordre ces mots finaux.

14 Une série de mots est lue à l'enfant qui doit ensuite les restituer par catégorie sémantique: la nourriture, puis les animaux.

15 Des séries de phrases sont lues à l'enfant qui doit juger si elles sont vraies ou fausses puis, à la fin de la série, restituer les derniers mots de chaque phrase.

16 Des séries de mots sont présentées à l'enfant qui doit repérer parmi ceux-ci les noms d'animaux. Par la suite, l'enfant doit restituer le dernier mot de chaque série.

En résumé, les capacités de la boucle phonologique et du calepin visuo-spatial différentient peu les enfants présentant ou non des difficultés d'apprentissage en mathématique. Par contre, les enfants peu doués pour le calcul se caractérisent pas des capacités d'administrateur central plus faibles que leurs pairs (et de manière plus nette encore s'ils éprouvent aussi une difficulté d'apprentissage en lecture). Cette faiblesse apparaît clairement dans les tâches numériques (les empans de chiffres en ordre inverse ou l'empan de comptage) mais elle est également présente dans certaines tâches non numériques (par exemple, l'empan de phrases).

C.2. Mémoire de travail et tâches de calcul

En accord avec Geary (1994), nous pensons que ces capacités limitées de mémoire de travail et, plus spécifiquement du composant administrateur central, pourraient contribuer à l'apparition des difficultés rencontrées par les enfants dyscalculiques dans la résolution des opérations arithmétiques. Selon Geary (1990, 1993, 1994), la constitution d'un fait arithmétique ne peut avoir lieu que si les représentations des termes du problème et de la réponse sont activées de manière simultanée en mémoire de travail. Par conséquent, un individu présentant de faibles capacités de mémoire de travail risque davantage de voir la trace du problème effacée lorsqu'il parvient, au terme d'un algorithme de comptage, à la solution de son calcul. Cet état de fait ne lui permettrait donc pas d'instaurer en mémoire à long terme une représentation du calcul et de la solution correspondante. Par ailleurs, à capacités de mémoire de travail égales, les enfants qui résolvent les calculs par l'application de stratégies immatures seraient dans de moins bonnes conditions pour la coactivation en mémoire de travail du problème et de la réponse étant donné le délai plus long et le nombre d'interférences plus important entre l'encodage du problème et l'obtention de la réponse[17]. Enfin, à stratégie de résolution équivalente, un individu qui déroule sa chaîne numérique avec aisance et rapidité parviendrait à la solution dans des délais plus brefs qu'un enfant pour qui ce déroulement est lent et coûteux. Or, il apparaît que les enfants dyscalculiques présentent des difficultés à tous ces niveaux: leurs capacités de mémoire de

[17] Cette situation a été évoquée par l'expérience de Thevenot, Barrouillet et Fayol (2001). Une paire de nombres (par exemple, 39 et 16) apparaît sur l'écran d'ordinateur. Les participants adultes doivent, soit les additionner en vue d'une comparaison de la solution à un troisième terme, soit simplement les comparer à un troisième terme. Après ces opérations, un quatrième nombre apparaît et les sujets doivent indiquer s'il s'agit ou non de l'un des deux nombres initialement présentés. Thevenot et coll. montrent que la reconnaissance est plus aisée après une simple opération de comparaison qu'après une tâche d'addition.

travail sont faibles, ils utilisent des stratégies de résolution des calculs immatures et leur comptage est moins efficient (Hitch & McAuley, 1991). Ces enfants sont donc dans les pires conditions pour pouvoir coactiver en mémoire de travail la représentation du calcul et de la solution correspondante. Ceci pourrait donc expliquer leurs difficultés à constituer un réseau de faits arithmétiques.

Outre ce constat, se pose la question de l'indépendance de ces trois facteurs de risque. Nous émettons l'hypothèse qu'une faiblesse de mémoire de travail rend compte à la fois du déroulement moins efficace de la chaîne numérique mais aussi de l'immaturité des stratégies de résolution des calculs. Quelques données préliminaires concernant ce premier point montrent effectivement que les enfants de maternelle qui ont de moins bonnes capacités mnésiques produisent une chaîne numérique verbale moins étendue (Imbert,2002) et d'un niveau d'élaboration inférieur à celui de leurs pairs (Noël, 2004). En ce qui concerne le second point, Noël, Seron et Trovarelly (2004) ont montré que les compétences en mémoire de travail permettaient de prédire le type de stratégie de calcul utilisée, quatre mois plus tard, par l'enfant. En effet, les capacités de la boucle phonologique (empan de chiffres, de mots courts et de mots longs et répétition de non-mots) mesurées en début de première primaire corrèlent de manière négative avec la fréquence d'utilisation de l'algorithme « comptage du tout » (r=-0,58) et de supports immatures comme le comptage sur les doigts (r=-0,37). En revanche, une corrélation positive est mesurée avec la fréquence d'utilisation de stratégies matures comme la récupération de faits en mémoire à long terme ou la décomposition (r=0,39) et l'adoption de stratégies mentales sans support visible (soit, pas de comptage verbal ou sur les doigts, r=0,35). Enfin, le taux de réponses correctes aux additions corrèle à la fois avec ces mesures du fonctionnement de la boucle phonologique (r=0,46) et avec une mesure des capacités de l'administrateur central (l'empan de phrases, r=0,46).

Comment comprendre ces résultats ? Au milieu de la première primaire (soit, lorsque les capacités de calculs sont évaluées dans l'étude), le pourcentage de récupération de la réponse est très faible (moins de 9%) et les additions restent massivement résolues par des stratégies de comptage. Celles-ci exigent un contrôle du déroulement de la chaîne numérique verbale: les numéraux verbaux doivent être énoncés sans omission et sans répétition. Or, les études de Healy et Nairne (1985) et Logie et Baddeley (1987) menées chez l'adulte montrent que la boucle phonologique joue un rôle important à ce niveau et qu'elle a une contribution significative chez l'adulte lorsque ceux-ci résolvent des calculs par la mise en œuvre d'une stratégie de comptage (Hecht, 2002). Par ailleurs, la plupart des stratégies de comptage exigent également un contrôle du nombre de pas de comptage déjà effectués et à mettre encore en œuvre. Ainsi, si pour additionner 8 et 7, un enfant compte à partir de 7, huit fois, il doit dérouler sa chaîne numérique verbale tout en incrémentant un compteur mental de manière à ne compter que 8 pas (7 + 8 = 8,9,10,11,12,13,14,15). Il se trouve donc en double tâche : récupérer en mémoire à long terme la chaîne numérique verbale et compter le nombre de mots énoncés. Théoriquement, l'administrateur central devrait être impliqué dans cette opération de coordination et la boucle phonologique pour le déroulement de la chaîne. Dans le cas des enfants, on s'attendrait donc à une corrélation entre le taux d'erreurs global et les capacités de la mémoire de travail, ce qui est effectivement le cas. Par ailleurs, lorsque l'analyse porte uniquement sur les items résolus par une stratégie de comptage donnée, par exemple, celle du comptage à partir du plus grand terme, une corrélation significative est également trouvée entre le taux de réponses correctes et les capacités de la mémoire de travail.

Enfin, on peut aussi penser que les enfants qui éprouvent des difficultés à monitorer leur comptage utilisent les doigts comme aide externe. Effectivement, une corrélation positive est obtenue entre les capacités mnésiques et la fréquence d'utilisation des doigts (r=-.37).

Il apparaît donc que des capacités mnésiques réduites sont associées à un retard dans le développement de la chaîne numérique et à l'utilisation d'algorithmes de résolution de calcul peu matures. On pourrait donc supposer que la faiblesse de mémoire de travail observée chez les enfants dyscalculiques contribue à l’apparition de leurs problèmes d’apprentissage en mathématique et, tout particulièrement, à leur difficultés à se constituer un réseau de faits arithmétiques en mémoire à long terme.

C.3. Fonctions exécutives

Dans la section précédente, nous avons souligné l'importance de l'administrateur central dans l’apprentissage numérique. Cette composante mnésique exerce différentes fonctions (gestion de double tâches, maintien et manipulation d'informations issues de la mémoire à long terme, flexibilité, attention sélective...). Selon Passolunghi et Siegel (2001), les faibles capacités observées à ce niveau chez les enfants en difficulté mathématique seraient liées à un encodage moins profond des informations et à des capacités plus faibles d'inhiber l'information qui n'est plus pertinente. En effet, dans l'empan d'animaux, les enfants doivent repérer parmi une liste de mots présentés oralement, ceux qui désignent des noms d'animaux. Cette attention particulière portée à ce type d'items conduirait à un encodage plus profond de ceux-ci. A cet égard, les auteurs remarquent que la différence entre les deux groupes de sujets se marque uniquement lorsque les mots à restituer ne sont pas des noms d'animaux, soit, sur les mots qui ont probablement subit un encodage moins profond. Concernant le second point, les auteurs notent que le nombre d'intrusions dans les séries rappelées (soit, rappeler un mot du début ou du milieu de la série plutôt qu'un mot de la fin de la série) est plus important chez les enfants mauvais en résolution de problèmes que chez ceux du groupe témoin. Ces intrusions signeraient la présence d'une faiblesse au niveau des processus d'inhibition des informations qui ne sont plus pertinentes pour la tâche en cours.

L'étude de Bull et Scerif (2001) visait à étudier directement les corrélations entre les performances mathématiques d'enfants et leurs capacités d'inhibition. Par ailleurs, d'autres mesures de fonctions exécutives ont également été considérées. Dans ce but, une centaine d'enfants de 3ième année (moyenne 7 ans et 4 mois) ont été soumis à un test de mathématique et à 5 tâches évaluant les fonctions exécutives: une mesure de la gestion de double tâche[18], une mesure de mémorisation (empan de comptage), deux mesures d'inhibition (Stroop couleur[19] (Stroop, 1935) et Stroop numérique[20]), et une mesure de flexibilité (le tri des cartes du Wisconsin[21], Heaton, Chelune, Talley, Kay & Curtiss, 1993). Des corrélations calculées entre les performances obtenues dans ces différentes épreuves montrent que les enfants faibles en mathématique se caractérisent par des capacités de mémoire de travail plus faibles (corrélation de 0,44 avec l'empan de comptage), un degré d'interférence au Stroop numérique plus réduit (corrélation de -0,46 avec le degré d'interférence) et une difficulté à abandonner un critère de classification précédemment récompensé pour passer à un nouveau critère (corrélation de -0,43 entre les scores en mathématique et les erreurs de persévération au tri des cartes du Wisconsin). De plus, ces trois corrélations restent significatives lorsque le QI et le niveau de lecture sont contrôlés. On ne peut toutefois manquer de remarquer que les trois tâches qui mettent en

18 On présente à l'enfant des séries de chiffres correspondant à son empan qu'il doit restituer tout en barrant des cases de manière à recopier un modèle.

19 Dans ce test, des noms de couleur (vert - rouge - bleu) sont imprimés dans des encres de couleurs variées. Le sujet doit nommer la couleur de l'encre dans laquelle sont écrits les mots et doit donc inhiber le processus de lecture des noms.

20 Une série de chiffres est présentée à l'enfant (par exemple, [222]) qui doit dire combien de chiffres sont écrits.

21 Ce test utilise des cartes qui diffèrent suivant la couleur, la forme et le nombre de stimuli dessinés. Au départ, 4 cartes sont étalées devant l'enfant. celui-ci doit ensuite classer toutes les cartes du paquet sur ces cartes modèles. C'est à partir des feed back de l'évaluateur qu'il doit détecter le critère de rangement (couleur, forme ou nombre). Après 10 rangements corrects, l'évaluateur modifie le critère. On observe alors si l'enfant persévère longtemps sur le critère précédent ou s'il est capable de trouver rapidement le nouveau critère en jeu.

évidence un lien significatif avec les performances en mathématique sont justement celles qui impliquent un traitement numérique, et plus spécifiquement, qui exigent un dénombrement. En effet, le test du Wisconsin implique notamment de trier les cartes suivant leur cardinal, le Strrop numérique, de dénombrer les chiffres, et l'empan de comptage, de dénombrer les points. Par ailleurs, les tests non numériques qui mettent en jeu les mêmes processus cognitifs d'inhibition (Stroop couleur) et de gestion d'une tâche de traitement et de mémorisation (gestion de la double tâche) ne donnent pas lieu à des corrélations significatives avec les performances en mathématique. Il se pourrait dès lors que ce soit l'habileté dans le processus de dénombrement lui-même qui soit crucial. En faveur de cette hypothèse, les auteurs rapportent que la vitesse à une simple tâche de dénombrement de croix (condition neutre du Stroop numérique) corrèle de manière significative (et négative) avec la performance dans le test de mathématique. Malheureusement, cette vitesse de dénombrement n'a pas été introduite comme variable contrôle dans le calcul des corrélations citées plus haut.

L'étude de Barrouillet, Fayol et Lathulière (1997) porte également sur le lien entre l'inhibition et les apprentissages mathématiques. Toutefois, plutôt que de mesurer les corrélations entre capacités d'inhibition et de calcul des enfants, ces auteurs se penchent sur une tâche numérique particulière et tentent de voir le rôle que l'inhibition pourrait y jouer. Plus précisément, Barrouillet et col. s'intéressent au fait que lorsqu'un individu s'est constitué un réseau de faits arithmétiques, la présentation d'un problème active automatiquement la bonne réponse mais aussi des candidats associés. Par exemple, la présentation de 3 x 4 active les nombres multiples de 3 (6,9,12,15,18,21,24, …) et ceux multiples de 4 (8,12,16,20,24, …). Pour répondre 12 et non 24 ou 16, le sujet doit donc être capable d'inhiber la représentation de ces nombres. L'idée de Barrouillet, Fayol et Lathulière (1997) est de montrer que les difficultés arithmétiques de certains enfants pourraient être dues à des processus d'inhibition en mémoire à long terme inefficaces. Dans une première expérience, Barrouillet et col. montrent que des adolescents (13 ans) qui présentent un retard scolaire général de 2 à 3 ans produisent plus d'erreurs que des témoins du même âge dans une tâche de production de multiplications à un chiffre et que, comme chez les sujets témoins, les erreurs consistent essentiellement en la production d'un nombre qui est un multiple de l'un des deux termes du problème. Dans la seconde, ils cherchent à montrer que cette différence de taux d'erreurs est due à une difficulté à inhiber les réponses fausses associées au problème. A cette fin, ils présentent à d'autres adolescents des mêmes classes, les problèmes dans une tâche de choix multiple où la réponse correcte est accompagnée de trois distracteurs. Dans la condition d'interférence nulle, ces distracteurs sont des nombres qui n'appartiennent pas aux tables de multiplication (par exemple, 4 x 6 = 22). Dans la condition de faible interférence, les nombres proposés appartiennent aux tables de multiplication mais pas à celles des termes du problème (par exemple, 4 x 6 = 21). Enfin, dans la condition d'interférence forte, les distracteurs sont des multiples de l'un ou l'autre des termes (par exemple, 4 x 6 = 18). Il apparaît que le pourcentage de réponses correctes est significativement plus bas dans la condition de forte interférence (74%) que dans la condition d'interférence faible (83%) ou nulle (82%). Les auteurs en concluent que ces adolescents présentent, en plus d'une difficulté de mémorisation, une difficulté d'inhibition des compétiteurs. Ils proposent alors le schéma développemental suivant: (1) les enfants résolvent les problèmes au moyen de procédures s'appuyant notamment sur le comptage, (2) ils passent à des stratégies de récupération en mémoire de la réponse, (3), leurs processus d'inhibition des réponses incorrectes se mettent en place et permettent alors une récupération rapide de la réponse correcte. Selon Barrouillet et coll., la difficulté des adolescents testés ici résiderait justement dans ce passage entre les étapes 2 et 3. On peut néanmoins regretter dans cette seconde expérience l'absence de groupe contrôle. On pourrait en effet penser que le même profil serait observé chez des sujets normaux, à savoir, un taux d'erreurs plus important dans la condition de forte interférence. Le point de comparaison critique serait alors la différence de sensibilité à cette condition dans les deux groupes.

En conclusion, plusieurs études apportent des résultats en faveur de l'hypothèse d'une faiblesse des fonctions exécutives, et en particulier de l'inhibition, chez les individus plus faibles en mathématiques (qu'il s'agisse des capacités de planification, de flexibilité ou d'inhibition). Toutefois, la prudence s'impose avant d'en tirer une conclusion forte. En effet, le niveau d'intelligence des populations contrastées n'était pas toujours pris en compte et plusieurs épreuves impliquaient des traitements numériques qui, à la base déjà, différenciaient les groupes faibles ou forts en mathématique. Les recherches futures devront tenter de préciser le type d'inhibition qui fait le plus défaut et les processus numériques dans lesquels elle intervient.

Acalculie acquise chez l'enfant

Jusqu'à présent, ce chapitre s'est intéressé aux dyscalculies développementales, c'est-à-dire aux difficultés d'apprentissages numériques qui peuvent apparaître au cours du développement de certains enfants. La cause sous-jacente à ces difficultés est souvent inconnue et il n'y à pas de rupture développementale entre un avant et un après. Dans le cas de troubles acquis par contre, un problème neurologique vient perturber un développement qui, au départ, était normal: des habiletés qui étaient présentes disparaissent, des processus qui étaient maîtrisés ne le sont plus, des acquisitions nouvelles se mettent en place difficilement (Temple, 1992a). Il y a donc régression d'habiletés qui étaient au départ normales, éventuellement associée à une perturbation dans les apprentissages ultérieurs. Classiquement, le terme *dyscalculie* est réservé aux troubles développementaux et le terme *acalculie* aux troubles acquis. Dans cette dernière section du chapitre, nous rapporterons les résultats de quatre recherches portant sur les conséquences, au niveau des apprentissages numériques, de lésions cérébrales survenant dans l'enfance.

La première de ces études est celle de Aram et Ekelman (1988). Ces auteurs soumettent des enfants présentant des lésions cérébrales unilatérales (non causée par un trauma, une tumeur ou une épilepsie mais plutôt de type accident vasculaire cérébral ou lésion périnatale) à des épreuves scolaires de mathématiques et de maîtrise du langage écrit. Les 20 enfants présentant une lésion cérébrale unilatérale gauche (LCG) obtiennent des scores inférieurs aux sujets contrôles dans les épreuves de langage écrit uniquement. En revanche, les 12 enfants atteints d'une lésion cérébrale unilatérale droite (LCD) ont des performances significativement plus faibles que les sujets témoins dans les deux types épreuves, mais avec une faiblesse majeure dans le test de mathématiques.

L'étude de Van Hout (2001) porte sur un groupe de 36 enfants (âge moyen: 8 ans et demi) victime de LCG (22 cas) ou de LCD (14). Des difficultés de calcul sont rencontrées plus fréquemment à la suite d'une lésion gauche (72% des cas) que d'une lésion droite (50% des cas) et surtout lorsque la lésion est post-rolandique quelque soit l'hémisphère atteint (plus de 80% des enfants dyscalculiques ont une lésion post-rolandique). Van Hout relève aussi des différences qualitatives dans les profils numériques suivant le côté de la lésion. Ainsi, les enfants dyscalculiques LCG présentent des difficultés de calcul variées (troubles de la rétention des faits arithmétiques, erreurs de transcodage: *12 lu treize, 825 lu huit mille vingt-cinq*) qui rétrocèdent rapidement (à l'exception des faits arithmétiques) et, en tous cas, plus vite que les troubles langagiers. Les difficultés numériques faisant suite aux LCD par contre, ne seraient pas accompagnées d'aphasie mais sembleraient plutôt secondaires aux troubles spatiaux (difficultés dans l'alignement des chiffres lors d'une procédure de calcul écrit , héminégligence dans la lecture de nombres: *1425 lu quatre cent vingt-cinq, 38 lu huit*).

Dans ces deux premières études, les lésions cérébrales sont apparues au cours de l'enfance mais à des âges très variés. Or, lorsque la lésion est très précoce (périnatale par exemple), il est malaisé de distinguer une acalculie acquise d'une dyscalculie développementale. Dans le premier cas, en effet, la survenue de la lésion doit entraîner une rupture dans un développement préalable normal. Dans le second cas, en revanche, la mise en place des activités numériques est anormale dès le début. Une conséquence supplémentaire de cette variation dans les âges d'apparition de la lésion est la différence de durée entre le moment de la lésion et celui de l'observation. Dans l’étude de Aram et Ekelman (1988) par exemple, certaines observations sont réalisées deux après la survenue de la lésion (lésion à 8 ans et test à 10 ans) et d'autres 17 ans après (lésion périnatale et test à 18 ans). Or, il est évident que tous ces facteurs peuvent exercer une influence décisive sur les performances cognitives évaluées (Taylor & Alden, 1997).

Sur ce point méthodologique, l'étude de Martins, Parreira, Albuquerque et Ferro (1999) est beaucoup plus propre. Ces auteurs restreignent leur échantillon à une population d'enfants ayant subi une atteinte cérébrale après l'âge de 7 ans et le suivi d'au moins une année scolaire en cycle primaire. Par ailleurs, l'évaluation est réalisée dans les 6 premiers mois suivant la maladie. L'échantillon respectant ces critères est constitué de 29 enfants droitiers âgés de 7 à 15 ans (moyenne de 11 ans 2 mois). Malheureusement, l’épreuve numérique utilisée est très limitée (résolution de 9 calculs) et présente un risque important de manque de sensibilité aux âges extrêmes considérés. A partir de cette courte épreuve, les auteurs définissent la présence d'une dyscalculie lorsque le score obtenu par un individu est inférieur au percentile 10 d'un échantillon de même niveau scolaire. Douze enfants rencontrent ce critère. La dyscalculie est plus fréquente chez les enfants qui avaient eu un échec scolaire avant la lésion et elle est fortement associée à la présence d'une aphasie acquise. En revanche, elle ne semble pas liée à la présence de difficultés visuo-spatiales, de négligence visuelle, de déficits visuo-moteurs ou au niveau du QI non verbal. Enfin, d’un point de vue anatomique, la dyscalculie tend à être plus souvent associée à une lésion bilatérale (67% des cas) qu'à des lésions unilatérales gauches (47%) ou droites (14%). Dans le cas de lésion gauche (18 cas dont 2 bilatéraux), l'incidence des troubles numériques n'est pas fonction du site cortical atteint (lésion pré- ou post-rolandique) mais est plus fréquente lorsqu'elle atteint le cortex (9/13 cas) plutôt que les structures sous-corticales (1/5 cas). Sur base de ces observations, les auteurs soulignent l'importance de l’hémisphère gauche dans l'apprentissage numérique.

La particularité de l'étude de Ashcraft, Yamashita and Aram (1992) est d’avoir complété un test d'aptitude scolaire en mathématiques par une série de mesures plus fines des compétences numériques (en particulier, des tâches de comptage rapide, de vérification d'additions, de repérage de chiffres et de résolution de soustractions écrites). Toutefois, la population à laquelle les auteurs s’intéressent souffre des mêmes biais méthodologique que ceux soulevés ci-avant (soit, une grande variance dans les âges lésionnels et les durées entre le moment de la lésion et le celui de l’évaluation). Trois groupes de patients sont ainsi comparés à des groupes témoins: 9 enfants (de moins de 12 ans) porteurs d'une LCG, 9 adolescents (de plus de 12 ans) avec LCG et 9 patients LCD (y compris un sujet adulte). Il apparaît que les séquelles de lésion cérébrale sont plus importantes après une LCG qu'une LCD et semblent s'atténuer au cours du développement. En effet, dans le test d'aptitude scolaire, la différence la plus nette avec le groupe contrôle se rencontre pour les enfants LCG (pc 37 versus pc 72) bien que des différences significatives soient également présentes pour le groupe des adolescents LCG (pc 49 vs. pc 61) ou les enfants LCD (pc 39 versus pc 60). Dans les tâches plus spécifiques, des différences entre groupe expérimental et groupe contrôle apparaissent aussi bien au niveau des connaissances déclaratives (par exemple, la connaissance des faits arithmétiques) qu'au niveau des connaissances procédurales (maîtrise des algorithmes de calcul écrit).

En conclusion, les études consacrées aux dyscalculies acquises chez l'enfant sont rares et difficiles à mener. Elles souffrent très régulièrement de lacunes méthodologiques concernant soit la population clinique étudiée, soit les épreuves administrées. Les quatre études que nous avons résumées ici conduisent à des conclusions contradictoires. Ainsi, une prépondérance plus nette de dyscalculie est notée après une LCG chez Van Hout (2001), Ashcraft et coll. (1992) et Martins et coll. (1999) mais Aram et coll. (1988) rapportent des résultats opposés. De la même manière, Martins et coll. (1999) observent que l'incidence des troubles numériques est équivalente lorsque la lésion est pré- ou post-rolandique alors que Van Hout (2001) note une incidence nettement supérieure lorsque la lésion est post-rolandique. Cette contradiction dans les résultats reflète probablement la variation dans les traitements numériques étudiés (lecture de nombres, réalisation de calculs, résolution de problèmes géométriques …) et les bases neuronales correspondantes. De façon analogue, elle pourrait également correspondre, comme le proposent Martins et coll. (1999), à un déplacement de la dominance hémisphérique au cours du développement. Ainsi, il est possible que les aspects visuo-spatiaux soient plus importants au début du développement (dénombrement, estimation de quantité …) et que les aspects langagiers prennent le dessus par la suite (comptage, calcul, transcodage …). Seules des études portant sur des groupes de sujets d'âge homogène et utilisant des tâches numériques ciblées permettront d'avancer dans ce questionnement.

VII. Outils de diagnostic

Outre les tests visant à estimer le niveau pédagogique de l'enfant, des batteries d'évaluation des compétences numériques sont disponibles pour permettre au praticien de poser un diagnostic et d'orienter la prise en charge de l'enfant. Nous détaillerons ici trois batteries normalisées sur une population d'enfants francophones: l'UDN2, le Numerical et le Tedi-math.

A. L'UDN2

L'UDN 2 (pour Construction et Utilisation Du Nombre) une batterie construite par Meljac et Lemmel (1999) qui se situe dans le droit fil des apports piagétiens (elle inclut d'ailleurs 8 épreuves développées par cet auteur et son équipe). Cinq grandes rubriques sont distinguées: (1) la conservation (de quantités discontinues ou continues comme le poids, la longueur, le volume, …), (2) les opérations logiques élémentaires (sériation , classification, inclusion et transitivité), (3) l'utilisation du nombre dans la vie courante (pour décrire une collection, comparer des collections, reproduire une collection, …), (4) la recherche de l'origine spatiale (comment utiliser les repères dans l'espace pour construire un objet identique à un témoin, en particulier, découper une ficelle ou un bande de papier), et (5) la connaissance des nombres transmises par les apprentissages (comprendre le vocabulaire des quantificateurs (plus que, moins que, …), réciter la suite des nombres, lire ou écrire des nombres, résoudre des opérations de calcul). Des normes ont été récoltées sur cinquante enfants par tranche d'âge (de 4 à 11 ans). Sur base de ces données, les auteurs ont défini des âges clé pour chaque épreuve, soit, l'âge à partir duquel l'épreuve est réussie par plus de 75% des enfants et échouée par moins de 10% des enfants. Lors de la passation de la batterie, les performances de l'enfant sont cotées en terme d'échec, de réussite ou de niveau intermédiaire et comparées à ces âges-clé. L'évaluation est donc qualitative plutôt que quantitative. Si ce système de cotation est très adéquat pour les épreuves piagétiennes type dans lesquelles *in fine* il s'agit de voir si l'enfant réussit ou non la tâche (par exemple, qu'il est conservant pour le nombre, le poids, le volume, …), il est moins approprié pour les épreuves où une évolution plus continue à lieu. Par exemple, le soustest de numération (de l'épreuve de connaissances) est considéré comme réussi si l'enfant est capable de réciter la chaîne numérique jusqu'à 120, qu'il commet une erreur maximum dans la lecture des 16 arabes nombres proposés (items de 1 à 5 chiffres) et une erreur maximum dans l'écriture des nombres sous dictée (17 items de 1 à 5 chiffres). Suivant ces critères, l'épreuve est réussie à 9 ans. Avant cela, la non réussite de l'épreuve est normale. Or, n'y-a-t il pas lieu de distinguer l'enfant de 7 ans qui peut écrire et lire les nombres jusqu'à cent de celui qui ne peut le faire que jusqu'à 10 ? Ou, chez les plus jeunes de 6 ans, celui qui sait compter jusqu'à dix et celui qui est déjà capable de compter jusqu'à cent ? Le même manque de sensibilité de l'épreuve se retrouve aussi pour l'épreuve d'opération. Dans ce cas, le critère de réussite est de produire une erreur de calcul au plus pour les opérations proposées (additions, soustractions, multiplications, divisions). L'âge clé correspondant est de 11 ans. Avant cela, les compétences de calcul sont difficilement distinguables.

Outre ce problème de cotation et de sensibilité de l'épreuve, se pose également la question de savoir si un test diagnostique de la dyscalculie doit ou non inclure des épreuves de raisonnement non numérique.

B. Le Numerical

Le Numerical est un outil développé par Gaillard (2000). Cette batterie s'inspire des travaux de la neuropsychologie adulte et, en particulier, du modèle de McCloskey, Caramazza et Basili (1985). Trois domaines sont évalués: le traitement du nombre, la sémantique et le calcul. Pour chacun d'eux, des représentations numériques variées (nombres verbaux oraux, écrits en toutes lettres ou en chiffres) sont contrastées. La batterie comporte 27 épreuves dont plusieurs sont issues ou adaptées de la batterie EC 301 (Deloche et coll., 1993) développée pour les acalculies acquises de l'adulte. Plus de 10 sous-tests évaluent les processus de transcodage des nombres (par exemple, lecture à voix haute de nombres écrits en toutes lettres, choix parmi 6 du nombre arabes correspondant au nombre dicté, …). On trouve également deux tâches de comptage (à l'écrit et à l'oral), une de dénombrement, trois tâches de calculs (simples ou utilisant des algorithmes écrits) et enfin des tâches sémantiques telles que la comparaison de nombre (dans les trois codes envisagés), l'estimation de quantité en contexte (par exemple, *20 pages dans une lettre, c'est peu, moyen ou beaucoup* ?), les connaissances numériques précises (par exemple, *combien de minutes y a t-il dans une heure* ?) ou le positionnement de nombres arabes sur des lignes analogiques du type thermomètre ou compteur de vitesse.

Cet outil s'adresse aux enfants de 2$^{\text{ième}}$ à la 4$^{\text{ième}}$ primaire (CE1 et CE2) et a été étalonné sur un échantillon de 280 enfants suisses. Le choix de l'auteur concernant cette population est lié au fait qu'une difficulté d'apprentissage des mathématiques ne peut s'observer qu'après une certaine période d'enseignement de la matière en question. Pour les enfants des tranches d'âges considérées, la batterie Numerical constitue un outil intéressant et riche. Toutefois, nous regrettons le poids énorme accordé aux épreuves de manipulation des codes numériques, au détriment de tâches évaluant la résolution de problèmes ou encore la compréhension du système en base 10.

Par ailleurs, l'option de l'auteur étant de développer un outil d'analyse des troubles d'apprentissage avérés, il ne s'est pas du tout intéressé aux traitements numériques pré-scolaires. Or, dès la maternelle, certains enfants vont montrer des difficultés de comptage, de dénombrement ou de compréhension des concepts numériques. Si ce type de difficultés n'est généralement pas repris sous l'étiquette dyscalculie, elles en sont toutefois les précurseurs et devraient dès lors, attirer l'attention des instituteurs et des cliniciens et déboucher sur une prise en charge spécifique.

C. Le Tedi-math

C1. Descriptif de la batterie

La batterie Tedi-math permet le diagnostic et l'analyse des difficultés d'apprentissage des écoliers de classe primaire mais aussi l'évaluation des pré-requis à cet apprentissage avant même l'entrée dans ce cycle d'études. Cet outil a été développé par Van Niewenhoven, Grégoire et Noël (2001). Dans la mise en œuvre de la batterie, les auteurs ont considéré les recherches issues des travaux piagétiens sur le raisonnement logico-mathématique de l'enfant, les études plus récentes de la psychologie cognitive du développement (en particulier, celles concernant le développement de la chaîne numérique verbale, du dénombrement, de la représentation en base 10 …) et les acquis de la neuropsychologie de l'adulte.

Cinq domaines de la cognition numérique sont évaluées: les opérations logiques sur les nombres, le comptage et le dénombrement, les systèmes numériques, la sémantique des nombres et l'arithmétique.

Contrairement à la plupart des batteries d'inspiration piagétienne, les opérations logiques sont ici appréhendées dans le domaine numérique uniquement. Ainsi, la sériation porte sur des collections à ordonner suivant leur cardinal ou des chiffres arabes à placer dans l'ordre croissant. De même, dans l'épreuve de classification, il s'agit de grouper les items suivant leur cardinal. Enfin, la même logique est appliquée aux épreuves d'inclusion, de conservation et de décomposition additive.

Le sous-test évaluant la maîtrise de la chaîne numérique verbale tient compte des travaux sur le développement du comptage chez l'enfant (en particulier, les travaux de Fuson, Richards et Briars, 1982) et permet d'évaluer à la fois le niveau d'acquisition de l'enfant (soit, jusqu'où il peut compter) mais aussi son niveau d'élaboration de la chaîne numérique (est-il capable de compter à partir d'une borne différente de un , de compter par pas ou à rebours, …).

Le sous-test de dénombrement contraste des planches présentant des petites et des grandes collections dont les éléments sont disposés en ligne ou de manière aléatoire. Par ailleurs, les tâches permettent d'évaluer la maîtrise des principes sous-jacents au dénombrement (Gelman & Gallistel, 1978).

L'évaluation du traitement des nombres symboliques s'inspire largement des modèles théoriques issus de la neuropsychologie de l'adulte et en particulier de celui de McCloskey, Caramazza et Basili (1985). Des épreuves variées permettent de mesurer la capacité de l'enfant à traiter les nombres arabes et verbaux oraux de manière isolée (dans une tâche de jugement de grammaticalité, de décision numérique orale ou encore de comparaison de nombres oraux, par exemple) et à passer d'un code à l'autre (transcodage). L'accès à la sémantique du nombre est évalué au travers de différentes épreuves de comparaison de la grandeur des nombres et par un sous-test abordant la compréhension et le raisonnement sur la base 10 de notre système numérique.

Enfin, la dernière série d'épreuves évalue les opérations arithmétiques. Les calculs proposés mettent en jeu des opérations variées (addition, soustraction, multiplication), des degrés de complexité divers (calculs sur des nombres inférieurs à 5, entre 5 et 9, nombres à deux chiffres), des modes de présentation de plus en plus abstraits (calculs avec support imagé, calculs avec inconnue en position finale (2+2=?) ou calculs lacunaires (?+5=8)) et puis de la résolution de problèmes. Un sous-test vise aussi à évaluer les connaissances conceptuelles des enfants, c'est-à-dire, leur compréhension des propriétés des opérations (par exemple, la commutativité de l'addition, le lien entre addition et soustraction, etc.).

Il s'agit donc d'une batterie de diagnostic détaillée qui exige une passation individuelle de 1 à 2h. Toutefois, la variété des exercices, leur caractère ludique et l'attractivité du matériel la rendent agréable pour l'enfant. L'outil a été étalonné sur une population de 583 enfants belges francophones et français. Ces enfants fréquentaient les classes de $2^{ième}$ maternelle jusqu'au classes de troisième primaire et les données ont été récoltées en début et en fin d'année scolaire de manière à obtenir des normes plus fines. L'outil permet donc un diagnostic des difficultés en mathématique dès le plus jeune âge. Il s'adresse aux écoliers dont le niveau d'acquisition en mathématique ne dépasse pas celui de la troisième année primaire.

C.2. Un exemple d'application

Philippe, un petit garçon hyperactif de 6 ans 11 mois, est venu nous voir parce qu'il doublait sa première année primaire (CP) en raison de difficultés d'apprentissage mathématique. Les performances obtenues par Philippe dans les différentes épreuves du Tedi-math ont été comparées à celles d'enfants de son niveau scolaire (début de $1^{ière}$ primaire) et à celles d'enfants ayant, comme lui, complété une première année primaire. Le profil des pourcentages cumulés correspondant est présenté dans le tableau 2.

Insérer le tableau 2

Le profil obtenu par Philippe est hétérogène. Une analyse détaillée de ses performances est donc nécessaire pour comprendre ce qui lui pose problème dans l'apprentissage numérique.

Au niveau de la chaîne numérique verbale, Philippe présente un niveau d'acquisition et d'élaboration suffisant pour son âge. Cependant, lorsqu'il s'agit de dénombrer une collection, il produit des erreurs liées à un manque de de coordination énoncé-pointage. Ce type de difficulté apparaît également dans les épreuves « opération logique » qui impliquent de dénombrer des éléments (dans les épreuves de sériation et de classification). Par contre, il montre une bonne maîtrise des principes sous-jacents au dénombrement (principe de cardinalité, de non-pertinence de l'ordre, de l'abstraction de la qualité des objets) et ses capacités de réflexion dans les épreuves d'opérations logiques (sériation, classification, inclusion) sont adéquates, sauf dans l'épreuve de décomposition additive. Dans cette dernière épreuve, en effet, Philippe ne propose que des décompositions en deux parties égales (pour 6, il propose 3 et 3, puis aussi 2 et 2 et enfin 4 et 4). Des difficultés apparaissent également dans les épreuves de calcul. Philippe se débrouille dans les petits calculs avec support imagé ou dans les résolutions de problèmes mais lorsque les calculs sont présentés en chiffres, il utilise essentiellement la stratégie du comptage du tout sur les doigts. Or cette stratégie est source d'erreurs (liées à sa difficulté de coordination énoncé-pointage) et est inadéquate pour les sommes supérieures à dix (faute d'un nombre de doigts suffisant pour représenter l'ensemble des éléments du problème). En outre, il est incapable de comprendre les énoncés de calculs lacunaires et ceux de soustractions (même si les énoncés sont lus à haute voix).

Enfin, les performances de Philippe dans les épreuves évaluant les systèmes numériques (lecture, écriture de nombres, jugement de grammaticalité, comparaison de grandeur, …) correspondent à un niveau moyen pour un début de première primaire mais à un niveau faible en comparaison à des enfants de fin de première primaire (il traite correctement les nombres jusqu'à 20 uniquement).

En résumé, Philippe a terminé une première année primaire sans pouvoir en retirer beaucoup de fruits. Comparés aux enfants du même âge, ses acquis en terme de calcul et de maîtrise des systèmes numériques sont faibles. De plus, lorsqu'on le compare aux enfants plus jeunes qui, comme lui, vont débuter une première primaire, des difficultés sont visibles en dénombrement et en arithmétique. Un travail de remédiation à ces deux niveaux devrait donc être mis en place pour donner à Philippe toutes ses chances de réussir cette fois son année scolaire.

D. Conclusion

S'il existe actuellement différents tests normés en français pour évaluer le développement numérique chez l'enfant, il faut cependant souligner que ceux-ci portent uniquement sur le traitement des nombres entiers positifs. Or, dès la seconde moitié du cycle primaire, les enfants sont confrontés aux nombres rationnels (décimaux, fractions) et cet apprentissage est source de difficultés importantes. Des outils ciblés permettant l'évaluation de la compréhension de ces notions sont donc nécessaires. Un projet de ce type faisant suite à la Tedi-math est actuellement en préparation (Noël & Grégoire, en préparation).

VIII. Pistes de rééducation

A notre connaissance, peu de rééducations des troubles des apprentissages en mathématique ont fait l'objet d'une mise à l'épreuve expérimentale. A titre d'exemple, nous présenterons ici la démarche rééducative suivie dans le cadre d'une difficulté de transcodage et de résolution de calculs simples.

De manière générale, toute rééducation doit se baser sur un bilan complet des capacités numériques de l'enfant. Ce bilan permet de cibler le ou les déficits sous-jacents mais aussi d'envisager plus finement le lieu fonctionnel du déficit sur lequel devra porter la rééducation. Ainsi par exemple, dans le cas d'un trouble du type alexie-agraphie des nombres, il sera utile d'évaluer les différentes étapes du traitement des nombres c'est-à-dire, les aspects lexicaux et syntaxiques de compréhension et de production des nombres dans les différents formats envisagés (par exemple, code verbal oral et code arabe). Ce type de démarche a, par exemple, été décrit par Sullivan, Macaruso et Sokol (1999) chez un garçon de 13 ans qui présentait des difficultés de transcodage. Une analyse cognitive montre que les erreurs de transcodage sont dues à un déficit des processus syntaxiques de production des nombres arabes. Les erreurs apparaissent donc chaque fois que l'enfant doit écrire des nombres à plusieurs chiffres, que ce soit sous dictée ou en transcodage à partir de nombres verbaux écrits en toutes lettres (par exemple, *trois mille cinq cent deux* est écrit 3.0502; *six cent quarante mille soixante quatre* est écrit 640.64). Il s'agit donc d'erreurs syntaxiques qui ne proviennent pas d'une difficulté de compréhension des nombres verbaux oraux ou écrits puisque la magnitude de ces nombres peut être comparée. La rééducation va alors comprendre deux étapes pour pallier à la difficulté de générer un cadre syntaxique adéquat pour produire des nombres arabes. D'abord, un cadre syntaxique sera fourni à l'enfant pour les nombres de 1 à 3 chiffres (par exemple, un cadre du type C(centaine)-D(dizaine)-U(unité) pour les nombres à trois chiffres). L'enfant apprendra sa signification et son utilisation lors du transcodage du code verbal écrit au code arabe (par exemple, transcoder trois cent huit en 308). Par la suite, les auteurs apprennent à l'enfant à générer lui-même son cadre syntaxique dans des activités de transcodage. Enfin, ce processus est répété pour des nombres plus longs (4 à 6 chiffres). Dans tous les cas, le travail a porté sur du matériel verbal écrit avec l'hypothèse que l'apprentissage se généraliserait aux situations où les nombres arabes devraient être produits à partir d'un nombre oral. Après seulement deux séances de 45 minutes, les auteurs notent une diminution significative du taux d'erreurs à la fois dans l'écriture des nombres arabes à partir de nombres verbaux écrits (55% à 19%) mais aussi dans un transcodage non travaillé, celui de l'écriture sous dictée de nombres arabes (47% et 12% d'erreurs). D'autre part, cette diminution du taux d'erreurs s'observe aussi bien pour des structures d'items travaillées que pour des structures nouvelles non considérées dans la rééducation. Il y a donc eu généralisation.

Dans le cas d'une acalculie des faits arithmétiques, les rééducations proposées chez l'adulte cérébro-lésé consistent essentiellement en un entraînement répété et intensif des faits arithmétiques (voir Girelli & Seron, 2000). Chez l'enfant, il semble que cette stratégie ne soit efficace que pour certains. Ainsi, Goldman, Pelligrino et Mertz (1988) observent que ce type de rééducation n'a pas apporté de bénéfice aux enfants qui, au départ, étaient les plus lents dans la réalisation de calcul. L'étude de Howell, Sidorenko et Jurica (1987) fait le même constat. Un entraînement intensif aux multiplications est donné à un jeune dyscalculique de 16 ans mais une amélioration transitoire uniquement est notée. Par contre, lorsque ce drill est accompagné d'un apprentissage de nouvelles procédures de calcul, un bénéfice à long terme apparaît. Par exemple, une procédure avait été enseignée pour résoudre les multiplications par 9 (n x 9 = n0-n). Une fois cette procédure apprise et pratiquée de manière répétée, une amélioration à long terme apparaissait pour la résolution de ces problèmes.

En conclusion

La dyscalculie est un trouble d'apprentissage aussi fréquent que la dyslexie. Il concerne l'apprentissage mathématique dans son ensemble et ne se restreint donc pas aux problèmes de calcul. Les difficultés rencontrées concernent la lecture et l'écriture des nombres, l'acquisition des faits arithmétiques, les procédures de calcul écrit, mais peut-être aussi la sémantique même du nombre. Plusieurs hypothèses étiologiques sont actuellement envisagées. En particulier, une composante génétique semble intervenir bien que des arguments empiriques plus puissants soient encore nécessaires pour le démontrer. Au niveau neurobiologique, plusieurs recherches soulignent le rôle important du cortex pariétal dans le traitement numérique et dans la dyscalculie développementale. En effet, les performances à des tâches sous-tendues par cette région cérébrale constituent un prédicteur assez spécifique des performances ultérieures en mathématique. D'autre part, une première étude en imagerie par RMN structurelle a montré que des enfants dyscalculiques présentaient une hypodensité de matière grise au niveau du sillon intrapariétal de l'hémisphère gauche. Par ailleurs, les enfants dyscalculiques présentent des capacités de mémoire de travail inférieures à celles des enfants témoins. Cette différence se marque essentiellement au niveau des tâches évaluant la composante d'administrateur central de la mémoire. De bonnes capacités cognitives à ce niveau semblent effectivement indispensables pour développer des stratégies de calcul matures et conduire finalement à l'élaboration d'un réseau de faits arithmétiques. Il est possible que ces capacités de mémoire de travail limitées découlent d'une plus grande sensibilité à l'interférence. Enfin, ce chapitre s'est clôturé par une perspective plus pratique dans laquelle nous avons présenté trois outils diagnostiques (l'UDN2 qui s'inscrit dans une perspective piagétienne, le Numerical qui s'inspire de la neuropsychologie de l'adulte et enfin le Tedi-math qui prend en considération les résultats issus de ces différents courants théoriques) et quelques pistes de remédiation pour les difficultés de transcodage et d'acquisition des faits arithmétiques.

Bibliographie

Adams, J.W., & Hitch, G.J. (1998). Working memory and children's mental addition. *Journal of Experimental Child Psychology,* ***67*****,** 21-38.

Alarcon, M.; DeFries, J.C.; Light, J-G. and Pennington, B.F. (1997). A twin study of mathematics disability. *Journal of Learning Disability*, **30(6),** 617-623.

American Psychiatric Association (1994). *DSM IV: manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux.* Traduction française par J.D. Guelfi. Masson, Paris, 1996.

Aram, D.M. & Ekelman, B.L. (1988). Scholastic aptitude and achievement among children with unilateral brain lesions. *Neuropsychologia*, **26(6),** 903-916.

Ashcraft, M.H., Donley, R.D.; Halas, M.A. & Vakali, H. (1992). Working memory, automaticity, and problem difficulty. In J. Campbell (Ed.), *The nature and origins of mathematical skills.* Amsterdam: Elsevier. Associates, Howe, UK.265 pp.

Ashcraft, M.H.; Yamashita, T.S.; & Aram, D.M. (1992). Mathematics performance in left and right brain-lesioned children and adolescents. *Brain and Cognition*, **19**, 208-252.

Badian, N.A. (1983). Dyscalculia and nonverbal disorders of learning. In H.R. Myklebust (Ed.), *Progress in learning disabilities*. (vol 5, **pp.** 235-264). New York: Stratton.

Baroody, A.J. (1987). The dvelopment of counting strategies for single-digit addition. *Journal for Research in Mathematics Education*, 18, 141-157.

Barrouillet, P.; Fayol, M. et Lathulière, E. (1997). Selecting between competitors in multiplication tasks: An explnation of the errors produced by adolescents with learning difficulties. *International Journal of Behavioral Development*, 21(2), 253-275.

Benton, A.L. (1977). Reflections on the Gerstmann syndrome. *Brain and Language*, **4**, 45-62.

Bishop, D.V.M.; Ross, V.A.; Daniels, M.S. & Bright, P. (1996). The measurement of hand preference: A validation study comparing three groups of right-handers. *Bristish Journal of Psychology*, **8**7, 269-285.

Bruandet, M.; Molko, N; Cohen, L. & Dehaene, S. (2004). A cognitive characterization of dyscalculia in Turner syndrome, Neuropsychologia, 42(3); 288-298.

Bull, R.; Johnston, R.S. & Roy, J.A. (1999). Exploring the roles of the visual-spatial sketch pad and central executive in children's arithmetical skills: views from cognition and developmental neuropsychology. *Developmental Neuropsychology*, 15(3), 421-442.

Bull, R. & Scerif, G. (2001). Executive functioning as a predictor of children's mathematics ability: inhibition, switching and working memory. *Developmental Neuropsychology*, 19(3). 273-293.

Butterworth, B. (1999). The mathematical brain. McMillan: London, 446 pgs.

Dehaene, S. & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.

Deloche, G.; Seron, X.; Larroque, C.; Magnien, C.; Metz-Lutz,,M.N.; Noël, M-P; Riva, I.; Schils, J.P.; Dordain, M.; Ferrand, I.; Baeta, E.; Basso, A.; Cipolotti, L.; Claros-Salinas, D.; Howard, F.; Gaillard, F.; Goldenberg, G.; Mazzuchi, A.; Stachowiak, F.; Tzavaras, A.; Vendrell, J.; Bergego, C. & Pradat-Diehl, P. (1994). Calculation and number processing: Assessment battery; Role of demographic factors. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 16(2), 195-208.

De Rammelaere, S.; Stuyven, E. & Vandierendonck, A. (1999). The contribution of working memory resources in the verification of simple arithmetic sums. *Psychological Research, 62*, 72-77.

De Rammelaere, S.; Stuyven, E. & Vandierendonck, A. (2001). Verifying simple arithmetic sums and products: Are the phonological loop and the central executive involved ? *Memory and Cognition, 29(2),* 267-273.

De Rammelaere, S. & Vandierendonck, A. (2001). Are executive processes used to solve simple mental arithmetic production tasks ? *Current Psychology Letters: Behaviour, Brain and Cognition, 2*, 79-89.

Dehaene, S.; Dehaene-Lambretz, G. & Cohen, L. (1998). Abstract representations of numbers in the animal and humain brain. Trends in NeuroScience, 21(8), 355-361.

Donlan, C. & Gourlay, S. (1999). The importance of non-verbal skils in the acquisition of place-value knowledge; evidence from normally developing and language-impaired children. *British Journal of Developmental Psychology*, **17,** 1-19.

Eger, E.; Sterzer, P.; Russ, M.O.; Giraud, A-L; & Kleinschmidt, A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron*, 37, 719-725.

Fayol, M.; Barrouillet, P. & Marinthe, C. (1998). Predicting arithmetical achievement from neuropsychological performance: a longitudinal study. *Cognition*, 68, B63-B70.

Fazio, B. (1994). The counting abilities of children with specific language impairments: A comparison of oral and gestural tasks. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, **37**, 358-368.

Fazio, B. (1996). Mathematical abilities of children with specific language impairment: A follow-up study. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, **39**, 839-849.

Fleischner, F.E.; Garnett, K. & Shepard, M. (1982). Proficiency in arithmetic basic fact computation by learning disabled and nondisabled children. *Focus on Learning Problems in Mathematics, 4(2)*, 47-55.

Fürst, A.J. & Hitch, G.J. (2000). Separate roles for executive and phonological components of working memory in mental arithmetic. *Memory and Cognition*, 28(5), 774-782.

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 ogical and mathematical cognition: Progress in cognitive development research* (pp. 33-92). New York: Springler-Verlag.

Fuson, K.C. (1992). Relationships between counting and cardinality from age 2 to age 8. In J. Bideaud, C. Meljac and J-P. Fisher (eds.). *Pathways to number. Children's developing numerical abilities*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, pp. 127-149.

Gaillard, F. (2000). « Numerical » : Test neurocognitif pour l'apprentissage du nombre et du calcul. Actualités Psychologiques. Université de Lausanne, édition spéciale.

Gallistel, C.R. & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, 44, 43-74.

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(2),*** 345-362.

Geary, D.C. (1994) *Children's Mathematical Development*. Washington, D.C., 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(5)**,* 787-797.

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., Widaman, K.F., Little, T.D., Cormier, P.(1987). Cognitive addition: comparison of learning disabled and academically normal elementary school children. *Cognitive Development, **2***, 249-269

Gelman, R. & Gallistel, C.R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge. MA: Harvard Univ. Press.

Gerstmann, J. (1940). Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia and acalculia. *Archives of Neurology and Psychiatry*, **44**, 398-408.

Girelli, L. & Seron, X. (2000). La revalidation des troubles du calcul et du traitement des nombres. P. 215-226. In X. Seron & M. Van der Linden. (eds.). *Traité de neuropsychologie clinique*. Tome 2, pp. 215-226. Solal, Marseille.

Goldman, S.R., Pelligrino, J.W., & Mertz, D.L. (1988). Extended practice of basic addition facts: Strategy changes in learning-disabled students. *Cognition and Instruction*, **5(3)**, 223-265.

Grigsby, J.P.; Kemper, M.B. & Hagerman, R.J. (1987). Developmental Gerstmann syndrome without aphasia in fragile X syndrome. *Neuropsychologia*, **25**, 881-891.

Gross-Tsur, V.; Manor, O. et Shalev, R.S. (1996). Developmental dyscalculia: prevalence and demographic features. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 38, 25-33.

Healy, A.F. & Nairne, J.S. (1985). Short-term memory processes in counting. *Cognitive Psychology, **17***, 417-444.

Heaton, R.K., Chelune, G.J., Talley, J.L., Kay, G.G. & Curtiss, G. (1993). *Wisconsin Card Sorting Test Manual: Revised and expanded*. New York: Psychological Assessment Ressources.

Hécaen, H., Angerlergues, R., & Houiller, S. (1961) Les variétés cliniques des acalculies au cours des lésions rétrorolandiques: Approche statistique du problème. *Revue Neurologique*, **105**, 85-103.

Hecht, S.A. (2002). Counting on working memory in simple arithmetic when counting is used for problem solving. *Memory and Cognition, 30(3),* 447-455.

Hitch, G.J. & McAuley, E. (1991). Working memory in children with specific arithmetical learning difficulties. *British Journal of Psychology, **82**,* 375-386.

Hurford, J.R. (1987). *Language and number. The emergence of a cognitive system.* New York: Blackwell

Howell, R.; Sidorenko, E.; & Jurica, J. (1987). The effects of computer use on the acquisition of multiplication facts by a student with learning disabilities, *Journal of Learning Disabilities*, **20**, 236-341.

Imbert, D. (2002). Premières aptitudes numériques : une étude longitudinale. Poster présenté lors de la Troisième journée des « troubles d'apprentissage du langage oral et écrit ». Aix-en-Provence, France, 15 novembre.

Isaacs, E.B.; Edmonds, C.J.; Lucas, A. & Gadian, D.G. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight: a neural correlate. *Brain* (2001), 124, 1701-1707.

Kinsbourne, M. & Warrington, E.K. (1963). The developmental Gerstmann syndrome. *Annals of Neurology*, **8**, 490-501.

Klein, J.S. & Bisanz, J. (2000). Preschoolers doing arithmetic: the concepts are willing but the working memory is weak. *Canadian Journal of Experimental Psychology, 54(2)*, 105-115.

Kosc, L. (1974). Developmental dyscalculia. *Journal of Learning disabilities*, **7**, 165-177.

Levine, S.C.; Jordan, N.C. & Huttenlocher, J. (1992). Development of calculation abilities in young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 53, 72-103.

Lewis, C., Hitch, G.J., & Walker, P. (1994). The prevalence of specific arithmetic difficulties and specific reading difficulties in 9- and 10-year-old boys and girls. *Journal of Child Psychology and Psychiatry,* ***35(2),*** 283-292.

Lochy, A. & Censabella, S. (à paraître). La production écrite des nombres: données développementales.

Logie, R.H., & Baddeley, A.D. (1987). Cognitive processes in counting. *Journal of Experimental Psychology,* ***13*****,** 310-326.

Logie, R.H.; Gilhooly, K.J. & Wynn, V. (1994). Counting on working memory in arithmetic problem solving. *Memory and Cognition, 22(4),* 395-410.

Marinthe, C.; Fayol, M. & Barrouillet, P. (1999). Performances perceptivo-tactiles et performances arithmétiques chez le jeune enfant. In S. Vinter & A. Ménissier (eds). *Les activités numériques, opérations logiques et formulations langagières: du normal au pathologique*. Presses Universitaires Franc-comtoises, Besançon, France.

Marinthe, C.; Fayol, M. & Barrouillet, P. (2001). Gnosies digitales et développement des performances arithmétiques. In, A. Van Hout & C. Meljac (eds). *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant*. pp. 239-254, Masson, Paris.

Martins, I.P.; Parreira, E.; Albuquerque, L.; & Ferro, J.M. (1999). Capacités de calcul chez des enfants scolarisés avec des lésions cérébrales acquises. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, **51**, 6-12.

McCloskey, M.; Caramazza, A.; & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, **4**, 171-196.

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.

Meljac, C. & Lemmel, G. (1999). UDN II, Editions du Centre de Psychologie Appliquée, Paris.

Mix, K.S.; Huttenlocher, J. & Levine, S.C. (2002). Multiple cues for quantification: Is number one of them ? *Psychological Bulletin*, 128(2), 278-294.

Molko, N; Cachia, A.; Rivière, D.; Mangin, J-F.; Bruandet, M.; Le Bihan, D.; Cohen, L. & Dehaene, S. (2003). Functional and Structural Alterations of the Intraparietal Sulcus in a Developmental Dyscalculia of Genetic Origin, *Neuron*, 40(4), 847-858.

Noël, M-P. (1991). Le transcodage chez l'enfant. In A. Van Hout & C. Meljac. *Les dyscalculies*. Masson, Paris. Pp. 109-117.

Noël, M-P; (2001a). Le transcodage chez l'enfant. In A. Van Hout & C. Meljac. *Les dyscalculies*. Masson, Paris. Pp. 109-117.

Noël, M-P. (2001b). Rôle de la mémoire de travail dans l'apprentissage du calcul. In A. Van Hout & C. Meljac. *Les dyscalculies*. Masson, Paris. Pp. 171-178.

Noël, M-P. (2002). La dyscalculie: un défaut de la représentation sémantique du nombre ? Etude exploratoire. Ecole et sciences cognitives. Les apprentissages et leurs dysfonctionnement. Poster présenté à Paris 28 janvier-1février.

Noël, M-P. (2004). Working memory and counting skis in preschoolers. Poster présenté au « european working memory sympposium, EWOMS II ». Beaune, France, 22-24 avril.

Noël, M-P., Désert, M. ; Aubrun, A. & Seron, X. (2001). Involvement of short-term memory in complex mental calculation. *Memory & Cognition, 29(1),* 34-42.

Noël, M-P., Seron, X. & Trovarelly, F. (2004). Working memory as a predictor of addition skills and addition strategies. A paraître dans *Current Psychology of Cognition*.

Noël, M-P. & Turconi, E. (1999). Assessing number transcoding in children. European *Review of Applied Psychology*, 49(4), 295-302.

Noël, M-P. & Verstraete, C. (en préparation). Capacités de mémoire de travail et dyscalculie: comparaison entre des mesures d'empans numériques ou non.

Palmers, E. & Noël, M-P. (2004). Bases phylogéniques et ontogéniques des traitements numériques. In X. Seron & M. Pesenti (ed.). *Traité de sciences cognitives : L'arithmétique cognitive*. Hermes

Passolunghi, M.C. & Siegel, L. (2001). Short-term memory, working memory, and inhibitory control in children with difficulties in arithmetic problem solving. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80, 44-57.

Paterson, S.J.; Brown, J.H.; Gsold, M.K.; Johnson, M.H.; Karmiloff-Smith, A. (1999). Cognitive modularity and genetic disorders. *Science*, 286, 2355-2358.

Power, R.J.D.; & Longuet-Higgins, H.C. (1978). Learning to count: A computational model of language acquisition. *Proceedings of the Royal Society of London,* **B. 200**, 391-417.

Raven J.C.; Court, J.H. & Raven, J. (1998). *Progressive matrices couleur*. Oxford Psychologist Press, Oxford.

Rourke, B.P. (1989). *Nonverbal learning disabilities: the syndrome and the model*. New York: Guilford Press.

Rourke, B.P. (1993). Arithmetic disabilities, specific and otherwise: A neuropsychological perspective. *Journal of Learning Disabilities*, **26(4)**, 214-226.

Rourke, B.P. & Conway, J.A. (1997). Disabilities of arithmetic and mathematical reasonning: Perspectives from neurology and neuropsychology. *Journal of Learning Disabilities*, **30(1)**, 34-46.

Rousselle, L.; Palmers, E. & Noël, M-P. (2004). Magnitude comparison in preschoolers: What count ? Influence of perceptual variables. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 57-84.

Rovet, J., Szekely, C., & Hockenberry, M.-N. (1994). Specific arithmetic calculation deficits in children with Turner Syndome. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, **16(6)**, 820-839.

Shalev, R.S.; Manor, O.; Awerbach, J.; Gross-Tsur, V. (1998). Persistence of developmental dyscalculia: what counts ? Results from a 3-year prospective follow-up study. The *Journal of Pediatrics*, September 1998, 358-362.

Siegler, R.S. (1987). The perils of averaging data over strategies: An example from children's addition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116, 250-264.

Spiers, P.A. (1987). Acalculia revised: Current issues. In G. Deloche & X. Seron (Eds.). *Mathematical disabilities. A cognitive Neuropsychological Perspective*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 281 pp.

Starkey, P. (1992). The eraly development of numerical reasoning. *Cognition*, 43, 93-126.

Stroop, J.R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.

Sullivan, K.S.; Macaruso, P. & Sokol, S.M. (1996). Remediation of Arabic number processing in a case of developmental dyscalculia. *Neuropsychological Rehabilitation*, **s**, 27-53.

Suresh, P.A. & Sebastian, S. (2000). Developmental Gerstmann sydrome: a distinct clinical entity of learning disabilities. *Pediatric Neurology*, 22(4), 267-278.

Ta'ir, J.; Brezner, A. & Ariel, R. (1997). Profound developmental dyscalculia: Evidence for a cardinal-ordinal skills acquisition device. *Brain and Cognition*, 35, 184-206.

Taylor, H.G. & Alden, J. (1997). Age-related differences in outcomes following childhood brain insults: An introduction and overview. *Journal of the International Neuropsychological Society,* 3, 555-567.

Temple, C.M. & Marriott, A.J. (1998). Arithmetical ability and disability in Turner's syndrome: A cognitive neuropsychological analysis. *Developmental Neuropsychology*, **14**, 47-67.

Temple, C.M. (1989). Digit dyslexia: A category-specific disorder in developmental dyscalculia. *Cognitive Neuropsychology*, **6(1)**, 93-116.

Temple, C.M. (1992a). Developmental and acquired disorders of childhood. in. I. Rapin, S.J. Segalowitz, F. Boller and J. Grafman (Eds.). *Handbook of Neuropsychology, Vol 6. Child Neuropsychology*, pp. 93-114.

Temple, C.M. (1992b). Developmental dyscalculia. in. S.J. Segalowitz, I. Rapin, F. Boller and J. Grafman (Eds.). *Handbook of Neuropsychology, Vol 7. Child Neuropsychology*, pp. 211-222.

Van Hout, A. (2001). Troubles acquis du calcul chez l'enfant. In A. Van Hout and C. Meljac (eds.) *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant*. Masson, Paris, pp. 201-212.

Van Niewenhoven, C.; Gregoire, J. & Noël, M-P. (2001). *Tedi-math. Test diagnostique des compétences de base en mathématiques*. Editions du centre de psychologie appliquée. Paris.

Wilson, J.T.L.; Scott, J.H. & Power, K.G. (1987). Developmental differences in the span of visual memory for pattern. British Journal of Developmental Psychology, 5, 249-255.

Wynn, K. (1995). Origins of mathematical knowledge. *Mathematical Cognition*, 1, 35-60.

Wynn, K. (1998). Psychological foundations of number: numerical competence in human infants. *Trends in Cognitive Science*, 2(8), 296-303.

Zago, L. & Pesenti, M. (2002). Les actiivités numériques. In O. Houdé, B. Mazoyer & N. Tzourio-Mazoyer (eds.). *Cerveau et psychologie: introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle*. Presses Universitaires de France. Paris.

Table 1: comparaison des trois groupes d'enfants dans les tâches mnésiques.

	Groupe témoin	Groupe dyscalculique	Groupe dyscalculique lecture faible	Valeur de F; p associé
Chiffres avant	3,85±1,01	3,79±0,62	3,88±0,57	<1, ns
Chiffres à rebours	3,17±0,64	2,46±0,33 ***	2,65±0,48 ***	8,3; 0,0001
Empan de comptage	3,08±0,89	2,33±0,68 **	2,33±1,01 **	4,38; 0,02
Catégospan	3,25±0,55	3,21±0,96	3,04±0,62	<1, ns
Empan de phrases	2,28±0,28	2,21±0,69 ***	2,00±0,52 **	6,74; 0,003

Note: la différence entre le groupe clinique considéré et le groupe témoin est significative à une valeur de p<0,01 (**) ou une valeur de p < 0,001

Table 2 : Profil des performances de Philippe

Sous-tests	Pourcentages cumulés Début 1ière primaire	Pourcentages cumulés Fin 1ière primaire
Opérations logiques	65	30
Estimation	80	60
Comptage	90	55
Dénombrement	**15**	**5**
Système numérique arabe	100	**15**
Système numérique oral	35	**15**
Transcodage	55	**10**
Système en base 10	-	-
Arithmétiques: items imagés	25	**10**
Arithmétique: items en chiffres	**5**	**< 5**
Arithmétique: problèmes	80	55
Arithmétiques: concepts	-	-

Encadré 1: Erreurs dans la conduite d'opérations arithmétiques.

Encadré 2: Exemples d'erreurs lexicales produites dans la lecture à voix haute de nombres arabes par Paul (Temple, 1989) et d'erreurs syntaxiques produites par CM dans l'écriture de nombres arabes sous dictée (Sullivan et col., 1996).

erreurs de Paul

1 lu /neuf/

85 lu /quatre-vingt-deux/

711 lu /sept cent dix-huit/

153 lu /cent vingt-trois/

592 lu /deux cent nonante-deux/

erreurs de CM

/neuf mille neuf cent trente/ écrit 9.9030

/cinquante mille nonante/ écrit 50.90

/soixante-six mille cent cinq/ écrit 66.15

/cinq cent mille un/ écrit 5.0061