Brève incursion sur le développement du calcul chez l'enfant

Par F. Lussier et J. Flessas
CENTRE D'ÉVALUATION NEUROPSYCHOLOGIQUE ET D'ORIENTATION PÉDAGOGIQUE FLESSAS LUSSIER
(Cenop-fl, Montréal, Québec, http://www.cenopfl.com)

Dr. Francine Lussier M.Ed., M.Ps., Ph.D.

Madame Francine Lussier détient une maîtrise en éducation et une maîtrise en psychologie ainsi qu'un doctorat en neuropsychologie. Elle a travaillé quinze ans dans l'enseignement aux niveaux primaire et secondaire. Après avoir pratiqué la neuropsychologie à l'hôpital Ste-Justine pendant quinze ans, madame Lussier a décidé de consacrer tout son temps au Cenop-fl fondé par elle en 1993. Elle est, avec madame Janine Flessas, co-auteur de plusieurs livres, dont *Neuropsychologie de l'enfant*, et de plusieurs tests d'évaluation.

Janine Flessas L.Ps.

Madame Janine Flessas est diplômée en psychologie scolaire et psychopédagogie spéciale de l'institut de la Sorbonne en France. Elle fait carrière en neuropsychologie au Québec où elle est une pionnière dans le domaine depuis 1969. Elle est, avec madame Francine Lussier, co-auteur de plusieurs livres, dont *Neuropsychologie de l'enfant*, et de plusieurs tests d'évaluation.

L'incontournable modèle théorique sur la genèse du nombre chez l'enfant provient de Piaget (1972). Dans une perspective constructiviste, l'acquisition de la notion du nombre était, pour Jean Piaget, intimement liée au développement logique qui se fait par stades successifs invariants. Les notions de classification (regroupement d'objets avec une caractéristique commune) et de sériation (mise en ordre des objets du plus petit au plus grand) seraient acquises à 4 ans pour des petites quantités. Les correspondances terme à terme (comparaison de quantité d'éléments) et le principe de conservation (indépendance de la disposition spatiale pour la permanence des quantités discrètes, c'est-à-dire dénombrables) ne seraient maîtrisés que vers 6 ans. Ainsi, de deux séries contenant le même nombre de billes, l'enfant de moins de 6 ans choisira automatiquement celles dont la disposition occupe le plus d'espace comme étant la plus grosse, parce que le critère *spatial* domine le critère *logique* de dénombrement. Van Hout (1995) rapporte cependant qu'actuellement les recherches sur la capacité perceptive du nourrisson remettent partiellement en question la théorie de Piaget. Les enfants de moins d'un an seraient en effet capables de comptage et d'appréhension spatiale avant même la manipulation d'objets. De plus, elle souligne qu'il existe des variations développementales dans le choix des critères de regroupement s'appuyant sur le mélange des critères logiques et spatiaux jusqu'à 3 ans, après quoi l'indépendance de ces deux critères s'installerait progressivement.

L'expérience quotidienne montre qu'avant tout apprentissage scolaire, l'enfant utilise déjà le nombre. Il peut réciter une petite suite de nombres et réaliser des dénombrements ou des correspondances terme à terme sur de petites quantités. Les nombres apparaissent donc assez tôt dans ses activités quotidiennes. Il les rencontre dans différents contextes et, intuitivement, il apprend la distinction entre les mots représentant des nombres et les autres mots. Ces mots constituent rapidement un domaine lexical relativement autonome et utilisable aussi bien en compréhension qu'en production. Camos et ses collaborateurs (1998) rapportent que la maîtrise de la chaîne numérique verbale (le comptage) contribue à l'élaboration du concept du nombre. Les recherches démontrent, en effet, que les processus de quantification, et notamment le comptage, sont des précurseurs cognitifs et linguistiques fondamentaux pour le calcul et les acquisitions arithmétiques (résolution de problèmes). La maîtrise de la séquence verbale est de toute première importance et sous-tend le développement des capacités arithmétiques au sens large. Elle influence l'acquisition des principes numériques de base tels la correspondance et la cardinalité, la conservation, l'énumération, l'addition, la soustraction et la division d'ensembles (Pesanti, 1995).

Même si la méthodologie de Piaget et sa thèse sur la genèse des nombres sont remises en question quant à l'âge d'apparition et l'inaltérabilité des stades (voir Pesanti, 1995, pour une critique), ses observations sur les activités cognitives des enfants restent riches de sens. L'examen des conduites de l'enfant durant les épreuves qu'il leur propose ne laisse aucun doute sur l'importance des habiletés visuo-spatiales qui se construisent de façon concomitante. Au début, l'enfant ne peut considérer qu'un nombre restreint d'objets à la fois dans une tâche de sériation l'entraînant à fabriquer plusieurs petites sous séries ; progressivement, il maîtrisera l'environnement spatial qui lui permettra de considérer la globalité des éléments pour constituer une seule grande série. Quand, dans des épreuves de conservation, l'enfant est incapable de dissocier la dispersion des objets et l'accroissement de la quantité, c'est que le raisonnement visuo-spatial domine le raisonnement logico-mathématique du dénombrement, celui-ci n'étant pas spontanément utilisé avant 6 ou 8 ans.

L'évolution des productions écrites de symboles numériques servant à représenter la cardinalité (la quantité) d'un ensemble suit, elle aussi, une progression développementale, et passe d'une représentation iconographique globale sans respect de la cardinalité (vers 3-4 ans) à la production du cardinal de l'ensemble en chiffres ou en lettres à 5 et 6 ans (Seron, 1997). L'appréhension visuo-spatiale des plus jeunes est tout de même accompagnée d'un début de représentation de la quantité, puisque chez eux les petites quantités (1 ou 2) sont reproduites par une ou deux graphies respectivement, mais à ce stade, cette notion de quantité ne comprendrait que trois éléments : un, deux et beaucoup.

La maîtrise du dénombrement exige 1) la connaissance de la chaîne numérique, 2) le pointage terme à terme de chaque élément d'un ensemble considéré une seule fois et une fois seulement et 3) la coordination de ces deux activités qui détermine avec précision la frontière entre les *déjà comptés* et les *encore à compter* (Fayol, 1990). Camos et ses collaborateurs (1998) ont voulu démontrer que des contraintes fonctionnelles affectant l'exécution de dénombrement pouvaient dégrader la performance (la réussite), sans altérer pour autant la compétence (la compréhension). À cette fin, ils utilisent un groupe d'enfants dysphasiques (pour qui l'énonciation des chaînes numériques constituent une contrainte), un groupe d'enfants dyspraxiques (pour qui le pointage constitue une contrainte) et deux groupes contrôles (pairés pour l'âge à chacun des deux premiers groupes) qu'ils soumettent à une épreuve de production comprenant quatre tâches : 1) une tâche de pointage avec des cibles soit aléatoires, soit alignées, 2) une tâche d'énonciation de la chaîne numérique verbale, 3) une tâche de dénombrement d'une collection homogène et 4) une tâche de dénombrement d'une collection comportant des interférents visuels soit dispersés aléatoirement, soit disposés linéairement. Ils administrent ensuite des épreuves comparables où les enfants doivent maintenant juger de l'exactitude ou des erreurs dans les réponses produites cette fois-ci par l'examinateur.

Cette deuxième série d'épreuves permet de savoir si l'enfant comprend le dénombrement et la quantité, connaît la chaîne numérique et la règle de pointage afin de déterminer si, à défaut de performance (dans la première série d'épreuves), l'enfant dyspraxique ou dysphasique possède quand même un niveau de compétence. Les résultats démontrent que les enfants de 7 ans réussissent toutes les épreuves. De plus, la disposition (aléatoire *vs* linéaire) affecte peu la réussite des sujets à la tâche de pointage, bien que ce dernier soit plus lent dans la condition aléatoire. Au contraire, les dénombrements dans la position aléatoire s'effectuent plus rapidement, qu'il y ait interférents ou non. Camos et ses collaborateurs n'expliquent pas pourquoi le dénombrement est plus rapide en disposition aléatoire, mais on peut certainement évoquer la possibilité qu'une dimension spatiale favorise cette activité et que la maîtrise des habiletés spatiales joue un rôle dans le dénombrement. D'ailleurs, les enfants dyspraxiques, affectés par des difficultés d'exploration spatiale, présentent un tableau de performances plus inquiétant que les dysphasiques : dans toutes les épreuves de production, les enfants dyspraxiques font plus d'erreurs que leur groupe contrôle et la différence est beaucoup plus importante qu'entre les enfants dysphasiques et leur contrôle. L'étude de Camos démontre donc l'importance d'une intégrité des fonctions visuo-spatiales dans le dénombrement chez l'enfant.

Après le passage de la maternelle, l'enfant poursuivra l'apprentissage des nombres par l'accès à des règles arbitraires de plus en plus complexes qui l'amèneront à comprendre la valeur des nombres et à pouvoir les produire. Il passera progressivement d'une appréhension intuitive, qui fait appel à ses capacités visuo-spatiales, à un système codifié, qui fait intervenir ses capacités logico-mathématiques. Toutes les civilisations ont élaboré un système de numération comprenant un certain nombre d'éléments et des règles qui les régissent afin de réduire la multiplicité des éléments nécessaires à son élaboration. Les différents systèmes ont cependant des règles distinctes qui leur sont propres et sont forcément dépendantes de la langue d'usage [1]. Dans le système verbal français, on trouve 25 éléments (ou *primitives lexicales*) comprenant quatre classes : les unités (*un à neuf*), les dizaines (*dix à soixante*), les particuliers (*onze à seize*) et les multiplicateurs (*cent, mille, million, milliard*), desquels tous les autres nombres découlent en suivant des règles grapho-phonologiques (syntaxe) qui définissent la numération. Le système arabe ne contient que 10 éléments (0 à 9) à partir desquels on peut constituer tous les autres nombres suivant une syntaxe qui, elle, repose sur une dimension spatiale, c'est-à-dire de position ; la valeur d'un élément dépend de sa position dans la séquence (voir l'approche en neuropsychologie cognitive ci-après). L'enfant apprend progressivement les règles syntaxiques de ces deux systèmes et les règles de transcodage lui permettant de passer d'un système à l'autre.

Dans une étude avec des enfants de deuxième année du primaire, Seron (1997) a examiné les erreurs habituelles que produisent les enfants durant leur apprentissage des règles de transcodage. Il conclut que les erreurs lexicales (confusion de la correspondance graphique du nombre, par exemple, *quatre mille vingt cinq* transcodé *3,025*) disparaissent avant les erreurs syntaxiques (par exemple, *quatre mille vingt cinq* devient *400 025*). Les erreurs syntaxiques proviennent d'abord du manque de maîtrise des règles des nombres arabes (*cent neuf* devient *1 009*), puis d'une généralisation abusive des règles « pivots » apprises (*si mille deux devient 1 002 alors mille douze devient 10 012 et mille vingt devient 10 020*). Seron note que *plusieurs enfants semblent suivre un patron d'évolution différent, soit qu'ils généralisent à partir d'une autre forme pivot, soit qu'ils présentent un quotient de généralisation particulier, soit qu'ils élaborent un autre ensemble de règles. Cette assez grande variabilité suggère l'existence de trajectoires différentes dans la maîtrise de l'écriture des numéraux arabes*. L'effet lié à l'ordre des apprentissages expliquerait pourquoi certaines formes de transcodage sont acquises plus tôt. L'analyse de ces données tend à démontrer que les difficultés proviendraient d'une faible maîtrise de la syntaxe arabe impliquée dans les mécanismes de production, plutôt que d'une mauvaise compréhension de la numération verbale.

Pour Meljac (1995), l'acquisition des compétences en mathématiques s'établit soit sur des bases interdépendantes, soit sur des bases hiérarchiques. Comme on l'a vu, le dénombrement ne s'effectue que lorsque la chaîne de numération, le pointage et la coordination des deux amènent à la cardinalité de la collection. L'algorithme de l'addition (pour des nombres plus grands que 10) repose à la fois sur le concept de somme, sur la connaissance de la numération de position (unités, dizaines, centaines), de même que sur la connaissance mémorisée et l'évocation des faits numériques (table d'addition). Ces activités sont donc interdépendantes dans l'élaboration de l'addition.

Il existe, cependant, des systèmes hiérarchiques aisément repérables dans le développement des conceptualisations arithmétiques. Les enfants ne comptent jamais au-delà de 10 avant de compter jusqu'à 10 ; les doubles sont plus facilement mémorisés (*6 + 6* est plus facile que *6 + 7*) ; les enfants réussissent à trouver l'état final d'une collection connaissant son état initial et la transformation qu'il subit (augmentation ou diminution), avant d'être capables de trouver l'état initial, connaissant l'état final et la transformation (exemple : *8 + 3 = ?* est plus facile que *? + 3 = 11*).

De fait, le développement des connaissances s'effectue le plus souvent sur une base hiérarchique, c'est-à-dire que l'acquisition d'une habileté repose sur celle qui la précède ; les concepts de dénombrement, la compréhension et la production des nombres sont progressivement acquis et généralement maîtrisés après la troisième année du primaire. Même si les connaissances se construisent de manière interdépendante ou de manière hiérarchique, à mesure qu'il progresse dans son apprentissage des mathématiques, l'enfant voit se diversifier les champs de cette matière, il développe des goûts et des compétences plus prononcés pour l'un ou pour l'autre. Quelques-uns préféreront les opérations de calcul, d'autres la géométrie, d'autres la résolution de problèmes durant le primaire. Bien que certaines matières paraîtront représenter des champs isolés pour l'adolescent au secondaire qui apprend à les maîtriser, l'examen attentif, au contraire, démontre qu'ils sont tous imbriqués les uns dans les autres, et qu'il s'agit de systèmes différents de communication pour exprimer une même réalité. Une équation quadratique en algèbre se représente sur un axe de coordonnées en géométrie analytique et se traduit en trigonométrie grâce aux radiants. Qu'arrive-t-il donc à l'enfant qui échoue à l'une ou l'autre des étapes de la construction des compétences en mathématiques ?

Dyscalculie développementale

La dyscalculie n'est pas un concept uniforme dans la communauté scientifique, clinique ou scolaire ; on retrouve une grande diversité de termes. Dans la quatrième version du *DIAGNOSTIC AND STATISTICAL MANUAL OF MENTAL DISORDERS* (Dsm IV), on retient le terme de *trouble du calcul*, qui requiert trois critères pour son diagnostic : 1) un retard significatif dans les tests standardisés de mathématiques par rapport à l'âge développemental ; 2) ce retard interfère avec la réussite scolaire ; et 3) il ne s'explique pas par un déficit sensoriel ; le problème peut donc coexister avec d'autres affections. La dixième version de la CLASSIFICATION INTERNATIONALE DES MALADIES ET PROBLÈMES DE SANTÉ CONNEXES (Cim 10) distingue les troubles spécifiques de l'arithmétique parmi la catégorie des troubles spécifiques du développement des habiletés scolaires, pour lesquels il existe des critères de recherche précis ; pour que le diagnostic soit posé, la note obtenue au test standardisé de mathématiques doit se situer à plus de deux écarts-types sous la moyenne, et l'enfant doit être exempt de trouble de lecture et de déficience intellectuelle.

Dans la continuité des troubles acquis du calcul observés chez l'adulte cérébro-lésé, les termes *dyscalculie* ou *acalculie* seraient plutôt réservés chez l'enfant à l'incapacité d'effectuer des opérations formelles (calcul), d'utiliser et d'intégrer les symboles numériques sans trouble de raisonnement associé. On doit reconnaître, toutefois, que ces troubles spécifiques isolés sont très rares et d'autres troubles y sont presque toujours associés.

Les recherches sur la prévalence de la dyscalculie sont donc nécessairement influencées par le concept qui la sous-tend, et celle-ci varie de 2 à 6 % selon les études. Cependant, dans une récente recherche auprès de 3 029 enfants, l'équipe israélienne de Gross-Tsur (1996), s'appuyant sur des critères stricts tirés des modèles en neuropsychologie cognitive pour poser le diagnostic de dyscalculie (voir ci-après), trouve 6,5 % d'enfants dont elle étudie les caractéristiques démographiques et cliniques. Tous les enfants dyscalculiques avaient un QUOTIENT INTELLECTUEL (Qi) normal, des symptômes de DÉFICIT D'ATTENTION AVEC OU SANS HYPERACTIVITÉ (Tdah) étaient trouvés chez 26 % d'entre eux, 17 % avaient aussi une dyslexie, et la dyscalculie touchait aussi bien les garçons que les filles, contrairement à ce que l'on retrouve dans plusieurs désordres développementaux (dyslexie, Tdah, Syndrome de Gilles de la Tourette) où les garçons sont atteints dans une plus grande proportion.

APPROCHE ANATOMO-CLINIQUE OU LOCALISATIONNISTE

Les causes neurologiques de la dyscalculie ont été beaucoup moins investiguées que dans la dysphasie ou la dyslexie, parce qu'elle passe plus souvent inaperçue, d'une part, et que, d'autre part, les conséquences pour ceux qui en souffrent sont apparemment moins lourdes. Seron et Deloche (1994) donnent un bref aperçu historique des travaux effectués avant les années 1980, qui cherchaient surtout à mettre en évidence les corrélations anatomo-cliniques. Les troubles acquis du calcul observés chez les adultes cérébro-lésés avaient permis d'associer différentes habiletés à des sites lésionnels distinctifs. L'ensemble des données regroupées à partir de ces patients laissait supposer que la perte de la capacité de lire des chiffres isolés ou des nombres (*alexie aphasique*) résultait de lésions pariétales gauches ou bilatérales ; les *acalculies visuo-spatiales*, qui se manifestent par des erreurs liées au non-respect de la position et de l'ordre des chiffres les uns par rapport aux autres, souvent accompagnés d'une perte des représentations topographiques et d'une héminégligence, provenaient le plus souvent de lésions pariétales droites mais étaient quelquefois aussi retrouvées à gauche ; l'*anarithmétie,* qui se traduit par une incapacité d'effectuer les opérations arithmétiques affectant le calcul mental et le calcul écrit, se retrouvaient chez des patients ayant des lésions bilatérales, mais plus marquées à gauche. C'est aussi de cette période florissante sur les données anatomo-cliniques que date la mise en évidence du *syndrome de Gerstman* après une atteinte pariétale gauche, lequel comporte une association de quatre principaux symptômes : une acalculie, une dysgraphie, une désorientation droite/gauche et une agnosie digitale.

Un survol des recherches sur les troubles du calcul acquis chez les enfants a récemment été fait par Van Hout (1995). Plusieurs cas d'aphasie acquise chez l'enfant, suggérant de ce fait une atteinte d'hémisphère gauche, présentent des troubles arithmétiques concomitants. Par exemple, l'atteinte gauche se caractériserait par une altération de la production et de la reconnaissance des nombres ; il y aurait alors des difficultés de séquenciation et de stockage des faits numériques dans la mémoire sémantique, c'est-à-dire des difficultés à retenir les tables (addition et soustraction). La rapide récupération du langage découlerait de son transfert à l'hémisphère droit avec limitation du développement normal ultérieur des fonctions sous-tendues par cet hémisphère, c'est-à-dire les fonctions visuo-spatiales. Après récupération de l'aphasie, les troubles d'apprentissage persistent surtout dans les mathématiques. Van Hout décrit également chez l'enfant un syndrome de Gerstman qui aurait été observé en maintes occasions : difficultés en lecture et en écriture de grands nombres (avec omission ou ajout de zéros), inversions de l'ordre des chiffres, alignement des nombres généralement défectueux dans les procédures ou algorithmes, confusions entre les signes des opérations et/ou mauvaise rétention des faits arithmétiques, auxquels s'associent une dysgraphie et une dysorthographie.

Van Hout relève cependant aussi quelques études qui démontrent une prédominance de troubles arithmétiques à la suite de lésions d'hémisphère droit qui se distinguent de ceux de l'hémisphère gauche. L'atteinte de l'hémisphère droit s'accompagnerait de difficultés dans la conceptualisation des quantités numériques, de difficultés dans le calcul mental obligeant les patients à utiliser des manipulations concrètes pour le comptage, de troubles visuo-spatiaux, d'un manque de coordination pour la main gauche avec une certaine préservation des compétences en lecture et écriture.

Reprenant les données cliniques de l'acalculie chez l'adulte, Badian (1983) définit quatre sous-types de dyscalculie chez l'enfant d'après la nature des erreurs dominantes. Dans l'*acalculie développementale* ou l'*anarithmétie*, l'enfant ne parvient pas à maîtriser suffisamment les algorithmes (les procédures ou la « mécanique ») des opérations mathématiques (addition, soustraction, multiplication et division). La *dyscalculie spatiale* touche les enfants qui ont de la difficulté dans l'agencement spatial des procédures et dans l'alignement de chiffres sous les bonnes colonnes de façon à respecter la valeur de position. L'*alexie* et l'*agraphie* pour les nombres se traduirait par une incapacité à dénommer et à écrire les nombres ; elle serait toutefois très rare chez l'enfant. Le plus grand nombre de cas est placé dans une quatrième catégorie que Badian appelle *dyscalculie attentionnelle séquentielle* ; elle se retrouve chez les enfants qui ont de grandes difficultés dans l'apprentissage et la restitution des faits arithmétiques ; ces enfants font également de nombreuses fautes d'attention dans la séquentiation des différentes étapes des algorithmes. La classification de Badian qui s'appuie sur un modèle anatomo-clinique ne permet cependant pas de comprendre les mécanismes cognitifs sous-jacents qui sont défectueux chez les enfants qui présentent de telles difficultés en calcul ou en arithmétique.

Rourke et ses collaborateurs (1985, 1993) adoptent une autre démarche et tentent d'établir une taxonomie des troubles d'arithmétique à partir du rendement scolaire en lecture, en écriture et en arithmétique ; ils forment ainsi trois groupes d'enfants qui présentent des troubles d'apprentissage : un premier groupe d'enfants ayant des troubles dans toutes les matières, un deuxième groupe présentant de meilleures compétences en arithmétique qu'en lecture et en orthographe puis un troisième groupe sans problèmes de lecture ni d'orthographe mais présentant des scores très faibles en arithmétique (au moins 2 ans inférieurs à leur groupe d'âge). Rourke soumet ensuite ces enfants à une batterie neuropsychologique extensive incluant l'*échelle de Weschler*. Sur la base des résultats à cette batterie, il trouve dans le premier groupe une diminution globale à tous les sous-tests. Dans son deuxième groupe, les fonctions visuo-spatiales sont intactes, mais il note une altération significative des fonctions verbales avec absence de supériorité de la main dominante suggérant globalement une atteinte d'hémisphère gauche. Finalement, dans son troisième groupe, il décrit un profil opposé c'est-à-dire une altération des habiletés visuo-spatiales avec fonctions verbales préservées. Il trouve également des signes discrets à tout l'hémicorps gauche suggérant davantage une atteinte d'hémisphère droit.

Reprenant par la suite ses études sur de plus larges groupes, il développera le concept d'une nouvelle entité diagnostique qu'il appellera *Non verbal learning disabilities* alors que d'autres équipes, observant le même phénomène, conserveront l'appellation d'un *syndrome d'hémisphère droit*. Les travaux de Rourke auront donc permis de conclure que, d'après les résultats obtenus à l'évaluation neuropsychologique, un certain nombre d'habiletés mathématiques relèveraient davantage de l'hémisphère gauche (son groupe 1) alors que d'autres seraient plus vraisemblablement imputables à l'hémisphère droit (son groupe 3).

Le déficit de langage (groupe 1), bien qu'affectant prioritairement la compréhension de lecture, serait aussi responsable des difficultés en mathématiques, parce qu'il entraîne une difficulté de compréhension des énoncés et des problèmes de mémorisation des faits arithmétiques ou des algorithmes. Par ailleurs, le déficit visuo-spatial (groupe 3) entraînerait des problèmes dans l'organisation spatiale des données numériques pour exécuter les algorithmes ou effectuer correctement les procédures (alignement défectueux des chiffres en colonnes, trouble du sens directionnel pour les opérations...).

Ce même déficit entraînerait aussi des problèmes de lecture ou d'écriture (omission d'une décimale, chiffres mal formés...) et une altération du jugement et du raisonnement, avec difficultés de transfert d'une habileté acquise dans un type d'exercices à d'autres procédures similaires.

Étudiant des groupes d'enfants comparables à ceux de Rourke (groupe 1 à 3), Siegle et Linder (1984) démontrent un déficit de la mémoire à court terme chez des enfants qui présentent un trouble généralisé d'apprentissage ; ce déficit est objectivé par des tâches auditivo-verbales et visuo-verbales (présentation visuelle et orale de séries de lettres). Inversement, les enfants qui ne présentent que des troubles spécifiques en arithmétique n'avaient de déficits qu'avec le matériel visuel. Dans ce dernier cas, il est cependant possible que ce groupe d'enfants aient mieux répondu aux critères de dyscalculie attentionnelle séquentielle dans la classification de Badian et qu'il s'agisse en fait d'enfants dont les problèmes arithmétiques s'expliquent essentiellement par un déficit d'attention comme on le retrouve beaucoup en clinique.

Approche en neuropsychologie cognitive

Insatisfaits aussi bien des rapprochements anatomo-cliniques que des conclusions tirées des études de groupes ou de cas uniques pour expliquer les mécanismes sous-jacents dans les diverses formes de troubles de calcul observés chez les patients, Sokol et ses collaborateurs (1994) ont emprunté le modèle de traitement numérique issu de la neuropsychologie cognitive chez l'adulte (M. Closkey et coll., 1985) pour l'adapter à la dyscalculie développementale. Il devient alors possible de décortiquer les différentes composantes impliquées et d'en définir un lexique très particulier à cette manipulation de chiffres et de nombres.

Le modèle de Sokol établit une première distinction entre les mécanismes de traitement numérique et les mécanismes de calcul. Dans les mécanismes de traitement numérique, le modèle distingue encore un mécanisme de compréhension numérique et un mécanisme de production numérique. Le premier est utilisé pour convertir les données numériques en une représentation sémantique nécessaire au traitement ultérieur à travers des procédures de calcul. Le second traduit les représentations sémantiques de nombres ayant subi une transformation par les procédures de calcul en une nouvelle forme spécifique. Les systèmes de compréhension et de production numériques se subdivisent à leur tour pour traiter les nombres arabes (p.ex., *127*) et les nombres verbaux (p.ex., *cent vingt-sept*). À l'intérieur de chacun des modules de compréhension et de production numérique, Sokol fait encore la distinction entre le traitement lexical et le traitement syntaxique, aussi bien dans la numération verbale que dans la numération arabe.

Le traitement lexical réfère à la compréhension et à la production des éléments primitifs au nombre de 25 dans le système verbal français et de 9 dans le système arabe (voir le sous-titre *développement du calcul chez l'enfant* dans la présente section). Le traitement syntaxique est constitué des règles qui président à l'ordonnancement des éléments primitifs pour signifier la valeur d'un nombre ; le système de notation arabe est strictement positionnel, puisque la valeur du nombre dépend de la position que le chiffre occupe dans la suite (*861 ≠ 681 ≠ 186*, etc) ; le système de notation verbale comprend une syntaxe qui permet de générer toutes et uniquement les expressions verbales acceptables de quantités (*quatre cents* correspond à *quatre fois cent* et *cent quatre* correspond à *cent plus quatre*). Le transcodage, c'est-à-dire le passage d'une forme numérique verbale à une forme numérique arabe et vice-versa, se fait de manière bi-univoque. Finalement, le système de numération verbale (mais non arabe) comprend un mécanisme de traitement phonologique pour les nombres entendus et un mécanisme de traitement graphémique pour les nombres écrits [2].

Au traitement numérique qui s'effectue à travers un système de compréhension et de production des nombres, s'opposent les mécanismes de calcul permettant d'opérer sur les nombres. Ces mécanismes se regroupent en trois principales unités. Il y a d'abord le traitement symbolique des opérations imposé par l'usage des symboles graphiques (+, -, *x*, ÷) et des symboles lexicaux (*plus*, *moins*, *multiplier*, *diviser*) ; les algorithmes des opérations correspondent aux règles et procédures d'exécution pour obtenir la résultante (*somme*, *différence*, *produit*, *quotient*) de l'opération (en *addition de dizaines ou de centaines*, par exemple : *commencer par les chiffres de la 1ère colonne d'extrême droite, poser le chiffre des unités et placer la retenue au-dessus de la 2ème colonne des dizaines...*) ; le modèle comporte, enfin, les faits arithmétiques (*tables de multiplication et d'addition*) requis pour automatiser et effectuer rapidement les procédures.

Ce modèle a l'avantage de pouvoir fractionner les différentes composantes du système du traitement du calcul en sous-systèmes et, ce faisant, il permet d'expliquer les déficits spécifiques de certains sous-systèmes observés chez des patients alors que d'autres sous-systèmes sont préservés. Sokol illustre par quelques cas cliniques des dissociations qu'il a pu observer chez ses propres patients ; il démontre, par exemple, l'indépendance entre le processus du traitement numérique et la procédure de calcul, puisque l'un peut être touché et l'autre intacte chez un patient, mais le phénomène inverse se retrouve chez un autre patient. De telles dissociations ont également été trouvées entre la production et la compréhension numériques, entre les traitements numériques arabe et verbal de même qu'entre le traitement lexical et syntaxique. Dans les mécanismes de calcul, des dissociations ont été démontrées entre la compréhension des symboles d'opération et les autres habiletés de calcul, entre la récupération des faits arithmétiques et l'exécution des algorithmes, entre les résultats du calcul et les approximations (pour une revue, voir Sokol et coll., 1994). Temple (1995) a, par ailleurs, démontré chez un de ses patients que la lecture des nombres était sélectivement touchée alors la lecture des mots était intacte. La démonstration de ces dissociations dans les acquisitions d'habiletés en mathématiques plaide en défaveur d'une évolution par stades successifs, comme le prétend le modèle piagétien, au profit d'une organisation modulaire du système arithmétique.

Quoique très attrayant pour expliquer un certain nombre de cas d'enfants qui présentent des troubles du calcul, ce modèle laisse en arrière-plan toutes les erreurs qui résultent des problèmes visuo-spatiaux dans d'autres cas. Sokol et ses collaborateurs avaient d'ailleurs utilisé une population d'enfants qui étaient tous dyslexiques, mais qui présentaient aussi des problèmes de calcul, évacuant ainsi toute la population clinique dont les problèmes de calcul seraient plutôt relatifs à l'hémisphère droit.

À la suite des travaux de McCloskey, Dehaene (1992) ajoutera un nouvel ensemble modulaire qui tiendra compte des activités numériques de quantification reposant sur la comparaison des nombres, l'appréhension immédiate (*subitizing*) et les approximations. Selon Dehaene, la représentation des quantités existerait aussi sous une forme analogique. C'est à partir de cette prémisse qu'il conceptualisera une nouvelle architecture fonctionnelle pour le traitement des nombres et du calcul, en y introduisant la notion de codes : l'un serait visuel arabe, un autre verbal auditif et finalement un troisième, analogique. Le code visuel arabe permettrait les calculs écrits (procédures) et le jugement de parité (l'exactitude). Le code verbal auditif jouerait un rôle dans le comptage (dénombrement) et le stockage des séquences verbales propres aux tables de multiplication et d'addition. Enfin, le code analogique représenté par une droite numérique autoriserait les comparaisons numériques, les approximations et l'appréhension immédiate de la valeur d'un nombre. Dehaene a pu mettre en évidence l'indépendance du code analogique en décrivant un patient qui, ayant perdu toute connaissance précise des nombres et des opérations, avait néanmoins conservé la capacité d'approximation des valeurs. Dans l'équation *2 + 2 = ?*, il est incapable de trouver *4* mais peut rejeter la proposition *9* (beaucoup trop distante de la vraie réponse) et accepter la proposition *5*. Le modèle de Dehaene vient ajouter une nouvelle dimension au modèle de McCloskey repris par Sokol (1994) mais, comme eux, il laisse en suspens toute la dimension visuo-spatiale (ou les afférences tactiles permettant de faire des inférences spatiales dans les cas de cécité) nécessaire à la maîtrise de nombreuses habiletés en mathématiques (géométrie plane, géométrie analytique, trigonométrie, disposition spatiale des algorithmes).

Nouvelle proposition d'un modèle

L'expérience clinique nous démontre, comme l'avait observé Rourke, que des enfants qui possèdent d'excellentes habiletés verbales éprouvent pourtant des difficultés majeures en arithmétique. L'examen des fonctions neuropsychologiques démontre fréquemment que le traitement visuo-spatial fait défaut chez ces enfants et parait expliquer un certain nombre de leurs difficultés en mathématiques. Une étude récente a, d'ailleurs, mis en relation l'excellence des habiletés spatiales chez les enfants gauchers surdoués en mathématiques (Rueckert et Levy, 1995). Les auteurs suggèrent un développement supérieur de l'hémisphère droit rehaussant les habiletés pour la réussite de tâches visuo-spatiales. Une autre explication suggérait une meilleure communication entre les deux hémisphères puisque, chez la plupart des gauchers, on avait aussi observé un épaississement du corps calleux. Selon ces auteurs, cette structure qui relie les deux hémisphères jouerait un rôle dans le transfert et la coordination entre les habiletés symboliques et analytiques de l'hémisphère gauche et les habiletés de représentation spatiale de l'hémisphère droit.

Il est donc essentiel de considérer cette dimension spatiale pour expliquer entre autres les erreurs de calcul dans des cas d'héminégligence où le traitement des nombres les plus à gauches ne sont pas pris en compte dans les procédures, mais ces cas sont extrêmement rares chez l'enfant. Il reste cependant un grand nombre de situations où la considération de l'espace est essentielle à la réalisation d'équations. Qui a déjà enseigné au primaire sait combien il est difficile d'enseigner la notion de *plus grand que* ou *plus petit que* à certains enfants à cause de la directionnalité du symbole (> <). L'apprentissage des procédures ou algorithmes doit lui-même procéder par repérage spatial (*on prend les deux premiers nombres situés à droite dans la colonne ...*, o*n place la retenue au dessus de...*). Il y a aussi toute la notion des nombres fractionnaires qui ne se comprend bien qu'à partir d'une représentation visuo-spatiale, et dont l'enseignement est si ardu. La compréhension des nombres négatifs s'effectue également sur une droite numérique (par définition, orientée). Outre le fait de l'appréhension immédiate (*subitizing*) sur de petits nombres (ou même sur des grands nombres chez certains enfants autistiques, dont les capacités visuo-spatiales ont été largement démontrées), il y a tout le domaine de l'approximation ou de l'estimation qui s'effectue généralement grâce aux fonctions d'hémisphère droit et qui sont nécessaires à la maîtrise des habiletés mathématiques. S'il est vrai que la maîtrise des faits arithmétiques s'effectue généralement par l'apprentissage par cœur d'une séquence verbale qui s'automatise (*deux fois deux quatre*, *deux fois trois six*...) et n'a besoin d'aucune représentation spatiale, c'est seulement grâce à la représentation spatiale qu'on peut en comprendre l'origine. En effet, le produit de *2,5 par 4* s'exprime par la surface d'un rectangle de deux unités et demi de largeur par quatre unités de longueur dont le décompte donne *10*. C'est, d'ailleurs, cette stratégie qu'on recommande aux enfants qui se montrent récalcitrants face à l'apprentissage des tables. Les tables d'additions s'effectuent également par l'entremise d'un tableau à double entrée.

On le voit ici, il apparaît donc utile d'intégrer au modèle cognitiviste la dimension spatiale qui n'a été considérée ni par McCloskey, ni par Sokol et à peine effleurée par Dehaene. Pour tenir compte de cette dimension spatiale, nous proposons un nouveau modèle qui s'appuie sur ceux qui ont été proposés pour expliquer la dysphasie et la dyspraxie.

Analyse des erreurs en mathématiques

Notre nouveau modèle entérine les prémisses retenues par McCloskey (1985) et par Sokol (1994), de même que celles de Dehaene (1992) et ajoute la dimension spatiale, mais il vise d'abord à intégrer l'ensemble des fonctions cognitives dont dispose le sujet apprenant. Le choix de la démarche cognitive reposerait tout d'abord sur les fonctions stratégiques (fonctions exécutives, raisonnement, mémoire et attention). Puis, les fonctions associatives seraient responsables du traitement numérique tandis que les fonctions instrumentales assureraient l'exactitude des mécanismes du calcul [3]. Ce modèle devrait donc permettre de mieux expliquer la diversité des difficultés en mathématiques mises en évidence lors des évaluations.

Ainsi, un mauvais choix dans les stratégies exécutives expliquerait à lui seul la plupart des erreurs rencontrées chez nos enfants en difficultés. Plusieurs enfants, comme l'avait rapporté Badian, échouent en mathématiques à cause des fautes d'attention ou d'impulsivité auxquelles sont associées les fonctions exécutives (oublient la retenue ou l'emprunt, les placent aux mauvais endroits, oublient un chiffre dans la colonne d'addition, soustraient au lieu d'additionner, n'alignent pas bien les chiffres, etc). Bull et ses collaborateurs (1999) viennent de démontrer le rôle de ces mêmes fonctions exécutives dans les performances en arithmétique. Utilisant le *Wisconsin Card Sorting Test*, ils ont trouvé que, même avec un Qi et des habiletés en lecture équivalents, les enfants ayant de moins bonnes habiletés en mathématiques avaient un pourcentage de réponses persévératives plus élevé. Dans les tâches d'estimation, bien qu'elles fassent certainement appel à la dimension perceptivo-spatiale, le jugement requis relève aussi davantage des fonctions frontales. Les stratégies de mémoire jouent, quant à elles, un rôle important dans l'apprentissage des faits et des procédures arithmétiques tout comme la mémoire de travail dans la résolution de calcul mental.

Notre modèle tient aussi compte du type d'erreurs identifié par Sokol dans sa population de dyslexiques ; en effet on y trouve : 1) des erreurs de transcodage (*372* ® ***trois sept cent deux*** ; ***huit mille deux cent dix sept*** ® *82 017*) ; 2) des erreurs de faits arithmétiques (*4 X 5 = 50* ; ***cinquante six***, par ***sept = six***) ; 3) des erreurs de compréhension des nombres arabes (*34 601* < *9 678*) ou des nombres verbaux (***trois cent mille six cent un*** < ***neuf mille six cent soixante dix huit*** ; 4) des erreurs de production dans le transcodage en arabe à partir d'un nombre verbal oral (***neuf mille neuf cent trente*** ®) ou d'un nombre verbal écrit (***trois mille cinq cent deux*** ® *30 502*) ; et 5) des erreurs proprement lexicales *13* ® ***trente***.

Le raisonnement est, enfin, largement impliqué dans la résolution de problèmes et son déficit ne saurait s'expliquer par le simple fait d'une difficulté de compréhension verbale. En effet, les enfants qui échouent en mathématiques ont parfois d'étonnantes capacités de compréhension verbale dans les autres domaines.

Räsänen et Ahonen (1995) ont recensé les écrits sur les tentatives de classification des erreurs en arithmétique. Le type d'erreurs commun aux cinq classifications qu'ils répertorient consiste en des erreurs de faits arithmétiques, des algorithmes incomplets (omissions d'une étape dans la procédure) ou incorrects et des opérations inappropriées (mauvais choix). Les autres erreurs décrites dépendent en grande partie du matériel utilisé pour les investiguer et de l'âge des sujets. Des difficultés fréquentes s'observent avec le concept zéro (confusion des opérations), mais la plupart des erreurs décrites correspondent en fait à des erreurs d'attention (bonne opération mais erreur de chiffres, oubli d'un chiffre ou erreur aléatoire). Bien que les auteurs attribuent aux mauvais lecteurs la plupart des erreurs de faits numériques, nous continuons de penser que celles-ci originent largement d'une mauvaise utilisation des fonctions stratégiques.

Dans une perspective neuropsychologique, il devient alors possible de mieux cerner quels types d'erreurs sont susceptibles de se présenter, en fonction des atteintes ou des dysfonctions cognitives des enfants évalués.

En effet, si la problématique du sujet est de nature verbale, les difficultés devraient être perceptibles aussi bien en lecture qu'en calcul, et être plutôt caractérisées par une atteinte de la représentation sémantique du nombre, à laquelle s'ajoutent des composantes phonologique et syntaxique, tel que le proposent les modèles de Sokol et McCloskey. Si l'atteinte est de nature non verbale, les erreurs devraient toucher plus largement les habiletés de raisonnement non verbal (tel que stipulé par Rourke), mais aussi celles qui dépendent du traitement analogique dans les habiletés de jugement perceptuel de quantités et l'organisation visuo-spatiale (rappelant le modèle de Dehaene). Si, enfin, le sujet présente plutôt une immaturité fonctionnelle de nature frontale, ce sont les modèles de Badian, Bull ou Räsänen qui s'appliquent. Il ne s'agirait plus alors de véritables dyscalculies, mais d'erreurs multiples, largement aléatoires, en relation directe avec le déficit attentionnel, l'impulsivité et l'absence générale de vérification que présentent ces enfants.

Évaluation neuropsychologique de la dyscalculie développementale

Il nous reste à aborder l'évaluation de ces enfants, qui nous arrivent en consultation parce qu'ils ont de mauvais résultats scolaires surtout en arithmétique associés ou non à des échecs en français.

L'*évaluation intellectuelle globale* parait toujours essentielle, à moins qu'on ait une bonne idée préalable de l'efficience du sujet. Cette évaluation permet non seulement de jeter un premier regard sur les compétences de l'enfant aux sous-tests mathématiques, mais pourra nous donner une information précieuse sur ses capacités linguistiques ainsi que sur la différence possible entre ses compétences verbales et non-verbales (ces dernières étant souvent affaissées chez les enfants en difficultés mathématiques). Un profil plus harmonieux mais très inférieur à la moyenne pourrait expliquer les difficultés d'abstraction qu'ils éprouvent en mathématiques.

Des difficultés marquées dans les tâches de langage nous orientent généralement vers des problèmes de compréhension ou d'interprétation des données de l'énoncé ou même de segmentation de l'énoncé. La reprise des énoncés, le temps écoulé avant la réponse et l'utilisation de matériel concret substitué à l'administration standard pourraient nous informer sur la qualité du raisonnement du sujet. Des difficultés marquées dans les tâches non verbales et particulièrement aux sous-tests de *blocs* (*cubes*) ou d'*arrangement d'images*, permettent également de suspecter un *syndrome de dysfonctions non verbales* qui s'accompagne presque toujours de difficultés en mathématiques.

L'évaluation des fonctions attentionnelles est aussi essentielle, car la plupart des erreurs en mathématiques proviennent de fautes d'attention. Comme chacun sait, tout le monde fait à un moment ou l'autre ce genre d'erreurs sans éprouver par ailleurs de sérieux problèmes en mathématiques. Les enfants qui souffrent d'inattention sont cependant beaucoup plus susceptibles de multiplier les erreurs en mathématiques. Dans ces conditions, les notes du bulletin en sont très affectées, bien que leur raisonnement soit généralement préservé. Il peut donc être utile de rassurer le parent sur les réelles compétences de l'enfant.

Une *faiblesse* de la mémoire, et plus spécialement de la mémoire de travail ainsi que des stratégies mnésiques utilisées, peut être la cause de difficultés à bien stocker et consolider les faits arithmétiques ou la séquence des étapes dans les procédures numériques. Des déficits dans les fonctions exécutives, notamment l'impulsivité, la rigidité, l'absence de planification, peuvent aussi expliquer quelques erreurs communes en mathématiques.

Lorsque les difficultés en mathématiques apparaissent majeures et qu'elles ne semblent pouvoir s'expliquer par d'autres atteintes plus spécifiques, telles celles du raisonnement verbal ou des capacités d'autorégulation frontale, il peut être souhaitable de proposer des tâches nous permettant de mieux cerner la nature des erreurs produites par le sujet. Ainsi, la maîtrise des algorithmes et des faits arithmétiques se vérifie facilement par le sous-test de c*alcul* de *Woodcock-Johnson* ; les trois sous-tests du *Stanford-Binet* (4ème édition) permettent de différencier les habiletés dans les problèmes raisonnés (quantités), de la manipulation des suites numériques et des équations, reposant plus largement sur des habiletés de traitement numérique de nature séquentielle.

Pour les plus jeunes, le sous-test d'*arithmétique* du Kaufman assessment battery for children (*K.abc)* se révèle également précieux pour différencier les difficultés de compréhension des énoncés des simples erreurs attentionnelles. En effet, le support imagé qui accompagne presque toujours les énoncés facilite grandement le traitement sémantique pour les enfants distractibles. La compréhension des règles syntaxiques (*deux fois plus*, *de plus que* ou la *fraction de l'ensemble*) y est par ailleurs nécessaire et son échec apparaît souvent indicateur de difficultés langagières ; par contre, peu d'éléments peuvent être utilisés pour repérer un trouble de nature plus non verbale (raisonnement ou organisation visuo-spatiale).

Mentionnons, enfin, que certaines batteries d'évaluation ont été conçues spécialement pour l'identification des dyscalculies sévères de l'adulte comme de l'enfant. La batterie *EC 301* a été conçue en 1994 dans le cadre d'un projet *calcul* d'un réseau de recherche clinique de l'Union Européenne. Deloche et son équipe, composée de chercheurs français et suisses (1995), en ont proposé une adaptation à l'intention des enfants du premier cycle primaire (niveaux cours élementaire de première et de deuxième année). Cette batterie constituée de onze tâches permet de déceler une atteinte spécifique de l'un des mécanismes inclus dans la description de notre modèle. Trois tâches évalueraient la compétence des mécanismes du calcul ou la maîtrise technique du comptage : dénombrement, comptage à rebours et calcul mental oral. Cinq référeraient plus spécialement au traitement numérique à l'intérieur du système verbal, donc s'appuyant largement sur les habiletés de traitement sémantique du sujet : transcodage de nombres en dictée et en lecture, comparaison de deux nombres à l'oral et à l'écrit (en chiffres), enfin résolution de problèmes arithmétiques. Enfin, les trois dernières feraient appel à un traitement numérique à travers le système analogique visuel. Il s'agit des tâches de positionnement d'un nombre sur une échelle analogique, de l'estimation perceptive de quantités et de l'estimation de quantités en contexte.

Les enfants en difficultés attentionnelles devraient plus souvent échouer le premier groupe de tâches, en raison de leur impulsivité et de leurs difficultés de concentration. Le second groupe devrait davantage différencier les sujets ayant une problématique de langage, celle-ci affectant sans doute tout autant leur rendement en lecture-compréhension. Quant au troisième groupe, il nous apparaîtrait discriminatif des enfants qui souffrent d'un syndrome de dysfontions non verbales, puisque cette problématique affecte de façon sensible leurs capacités à interpréter les afférences visuelles de nature tant perceptuelle que visuo-spatiale.

[1] Même à l'intérieur de la langue française, il existe des régionalismes. Par exemple, certaines régions font usage des racines latines pour exprimer les trois dernières dizaines (septante, octante, nonante) qui, à notre avis, porte beaucoup moins à confusion lors de l'apprentissage de la numération.
[2] Le nombre en *italique* dans le texte correspond à la forme orale (huit, 8) et les nombres en ***italique et gras*** correspondent à la forme écrite (huit, 8).
[3] Cette dissociation est mise en évidence par un de nos patients déficient intellectuel moyen qui ne comprenait pas la logique des opérations de calcul qu'il devait utiliser dans un problème complexe, mais pouvait néanmoins effectuer une division complexe parce qu'il en avait mémorisé l'algorithme. L'inverse est cependant plus souvent observé. L'enfant sait parfaitement quoi faire mais ne maîtrise pas l'algorithme.