

11

Dyscalculie et troubles de l'apprentissage de l'arithmétique

Ce chapitre recense les études ayant trait aux troubles des apprentissages affectant les activités numériques connus sous le nom de dyscalculie. Une recension totalement exhaustive des études abordant ce sujet est probablement impossible pour plusieurs raisons. D'une part, comme nous le verrons, ces troubles sont désignés de plusieurs manières différentes, sans que les divers vocables recouvrent par ailleurs de réelles différences, ce qui rend l'exhaustivité difficile à atteindre. D'autre part, ces troubles intéressent un grand nombre de disciplines (didactique des mathématiques, sciences de l'éducation, psychologie, neuropsychologie, neurologie, psychiatrie, génétique) ne partageant pas les mêmes normes et habitudes de publication. Toutefois, nous nous sommes efforcés de recenser les travaux les plus importants dans le domaine et pensons y être parvenus. Parmi les troubles affectant les habiletés numériques, nous avons écarté les études portant sur les troubles acquis suite à des traumatismes, des lésions ou des dégénérescences pour nous concentrer sur les troubles dits développementaux affectant les apprentissages d'enfants réputés ne souffrir d'aucune atteinte organique identifiée. Toutefois, en raison de leur intérêt théorique et de l'éclairage qu'elles peuvent apporter à la compréhension de la dyscalculie de développement, nous mentionnerons les études portant sur la dyscalculie chez des enfants atteints de certaines maladies chromosomales ou syndromes neurologiques.

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'état actuel de la recherche dans le domaine de la dyscalculie développementale en ce qui concerne la définition et les critères diagnostiques du trouble, la nature de ses manifestations, les facteurs causaux qui le sous-tendent, son évolution avec l'âge ainsi que ses liens avec d'autres troubles des apprentissages. Disons tout de suite que la recherche dans le domaine de la dyscalculie n'en est qu'à ses débuts et qu'elle est beaucoup moins avancée que ne l'est par exemple la recherche sur la dyslexie. La dyscalculie est ainsi fréquemment présentée comme un trouble négligé (Sutaria, 1985 ; Geary, 1993 et 1994 ; Noël, 2000 ; Van Hout, 2001 ; Butterworth, 2005) et nous tenterons dans la discussion d'en dégager les raisons.

Il n'existe pas de définition et encore moins de critères diagnostiques unanimement acceptés de la dyscalculie. Le terme même de dyscalculie n'est pas universellement utilisé pour désigner le trouble. Le terme de « dyscalculie de développement », introduit par Kosc (1974), est utilisé par Badian (1983), Shalev et Gross-Tsur (1993 et 2001) ainsi que par Butterworth (2005). D'autres auteurs parlent de difficultés en arithmétique (*arithmetic difficulties*) comme Lewis et coll. (1994) ou encore de troubles des apprentissages en mathématiques (*learning disabilities in mathematics*) comme Geary et Hoard (2005). Ce même auteur emploie souvent les termes de handicap en mathématiques (*mathematic disabilities*, MD, ou *mathematically disabled children*) de même que Rourke (*arithmetic disabilities*, Rourke, 1993) ou Silver et coll. (1999). Jordan emploie pour sa part le terme de difficultés en mathématiques (*mathematic difficulties*, Jordan et coll., 2003b). Ces auteurs parlent-ils de la même chose ? Pour Butterworth (2005), il convient de distinguer les études sur la dyscalculie développementale des études expérimentales sur les causes des difficultés d'apprentissage des mathématiques. En effet, les secondes adoptent comme limite d'inclusion, le 20^e, le 25^e, parfois le 35^e centile sur des épreuves standardisées de mathématiques alors que les études de prévalence font état de 5 à 7 % d'enfants dyscalculiques. Toutefois, les études épidémiologiques portant sur la dyscalculie développementale utilisent elles aussi des épreuves de performance en arithmétique pour classer les individus, le taux de 5 à 7 % dépendant seulement de critères fixés a priori (par exemple, avoir deux ans de retard dans une échelle standardisée de performance).

Ceci est lié au fait que la définition usuelle de la dyscalculie est très grandement circulaire. Le premier, Kosc (1974) la définit comme « un trouble structurel des habiletés mathématiques dont l'origine est génétique ou liée à un problème congénital affectant les aires cérébrales qui sont le substrat anatomophysiologique direct de la maturation des habiletés mathématiques sans trouble simultané des fonctions mentales plus générales ». Pour Temple (1992), il s'agit « d'un trouble des compétences numériques et des habiletés arithmétiques qui se manifeste chez des enfants d'intelligence normale qui ne présentent pas de déficits neurologiques acquis ». En dehors du fait que ces définitions écartent les problèmes liés à un faible niveau intellectuel ou à des troubles apparaissant suite à des problèmes de type neurologique venant perturber un développement jusque-là normal, le seul critère d'inclusion demeure la faiblesse des acquisitions numériques et arithmétiques. Conscient de ce problème et du fait que, dès lors, les problèmes de prévalence se résument à la définition de critères a priori, l'un d'inclusion portant sur le niveau de performance en arithmétique en dessous duquel on parlera de dyscalculie, l'autre d'exclusion portant sur un niveau intellectuel minimal requis (en terme de QI), Butterworth (2005) suggère une approche alternative reposant sur des critères qualitatifs et l'adoption de la définition proposée par le *UK Department for Education and Skills*. Selon cet organisme, la dyscalculie serait « un état qui affecte la capacité à acquérir des habiletés arithmétiques. Les élèves dyscalculiques peuvent avoir des difficultés à comprendre les concepts numériques simples, une

absence de compréhension intuitive des nombres, et ont des difficultés pour apprendre les faits numériques et les procédures. Même s'ils produisent la réponse correcte ou utilisent une méthode correcte, ce serait de manière mécanique et sans confiance en eux-mêmes ». Cette définition a le mérite de ne pas se limiter au symptôme (une difficulté d'apprentissage) mais d'aborder les causes (un état ou condition qui affecte les capacités d'apprentissage elles-mêmes). Toutefois, l'absence de confiance ou le caractère mécanique de la réponse, pour ne pas parler de la compréhension « intuitive » des « concepts » numériques, semblent bien difficiles à établir objectivement. Ainsi, nous considérerons ici provisoirement que les travaux se rapportant aux *learning disabilities in mathematics* ou *mathematical disabilities* concernent la dyscalculie dans la mesure où il n'est pas établi que les populations visées par cette littérature diffèrent qualitativement de celles que d'autres auteurs désignent par le terme de dyscalculie développementale, toutes étudiant des enfants présentant des difficultés d'apprentissage de l'arithmétique et des performances nettement inférieures à la normale dans des épreuves standardisées. Il est en effet extrêmement fréquent que les études portant sur les *mathematical disabilities* prennent en compte l'intelligence des sujets, soit en contrôlant les effets (Jordan et coll., 2003b), soit en excluant les enfants ayant des QI trop faibles (Geary et coll., 2004). En outre, ces études fournissent des données essentielles sur la nature des troubles, le plus souvent en fonction de l'existence ou non de troubles associés en lecture, données sans lesquelles il semble impossible de comprendre ce qu'est la dyscalculie et quels sont ses déterminants.

Une première partie sera consacrée aux données épidémiologiques concernant la prévalence dans la population générale et l'héritabilité du trouble, ainsi que les données concernant la comorbidité. Une seconde partie sera consacrée aux manifestations de la dyscalculie. Seront abordés les travaux relatifs à la nature des déficits observés, aux diverses classifications en sous-types qui ont été proposées (on verra qu'elles sont nombreuses), aux facteurs causaux qui ont été invoqués pour expliquer ces déficits et à leur évolution avec l'âge au cours de la scolarité. Cette seconde partie se terminera par l'évocation des toutes premières et récentes études sur les programmes de remédiation. Enfin, une conclusion synthétisera les points de consensus ainsi que les désaccords entre chercheurs concernant la dyscalculie.

Données épidémiologiques et prévalence

En ce qui concerne l'estimation de la prévalence de la dyscalculie dans la population scolaire, on dispose de cinq études ayant porté sur de larges populations. Il s'agit des études de Kosci (1974), Badian (1983), Lewis et coll. (1994), Gross-Tsur et coll. (1996) et Desoete et coll. (2004). L'étude d'Ostad (1998) parfois retenue parmi les études sur la prévalence est avant tout une étude sur la comorbidité entre troubles du calcul et de l'orthographe qui sera évoquée plus

loin. Comme l'indique le tableau 11.1, ces études font état d'un taux de prévalence allant de 3,6 à 7,7 %. Bien que ces différences puissent paraître mineures, elles ont de quoi frapper, de même d'ailleurs que certaines absences de différence. Par exemple, Badian (1983) observe approximativement le même taux de dyscalculiques que Gross-Tsur et coll. (1996), ce qui est fort étonnant : la première étude adopte en effet un critère d'inclusion laxiste (score inférieur au 20^e percentile au *Stanford achievement test*) et pas de critère d'exclusion alors que la seconde adopte un critère d'inclusion plus strict (deux années de retard scolaire) auquel s'ajoute en outre un critère d'exclusion (QI inférieurs à 80). Kosc observe approximativement le même taux en utilisant un critère d'exclusion plus strict (QI inférieur à 90). Les taux observés par ces deux études sont proches de ceux relevés par Desoete et coll. (2004) qui utilisent un critère d'inclusion se rapprochant de celui de Shalev et coll. (1993) (2 écarts-types en dessous de la moyenne à un test standardisé) mais pas de critère d'exclusion. Si l'on compare deux des études les plus récentes qui sont les mieux contrôlées (Lewis et coll., 1994 ; Gross-Tsur et coll., 1996), la prévalence varie pratiquement du simple au double. Ceci est sans doute dû au fait que l'évaluation du niveau intellectuel des enfants par Gross-Tsur et coll. (1996) ne reflète pas leurs capacités réelles. En effet, sur une population de 3 029 enfants de CMI, les auteurs sélectionnent les 600 enfants les plus faibles en arithmétique parmi lesquels ils ne conservent que 188 enfants dont les scores à une batterie standardisée de tests mathématiques reflètent un retard de deux années scolaires. Parmi ces 188 enfants, 143 peuvent être vus pour des examens psychologiques complémentaires dont le test d'intelligence WISC-R (*Weschler Intelligence Screening*). On peut sans risque de se tromper penser qu'une telle population a toutes les chances de présenter un QI moyen inférieur à celui de la population générale. Or, le critère d'exclusion retenu par les auteurs (un QI inférieur à 80) les conduit à écarter 3 enfants seulement. Rappelons que dans une population tout-venant, les scores à la WISC-R ont par construction une moyenne de 100 et un écart-type de 15. Ceci signifie que la population testée par Gross-Tsur et coll. (1996) devrait contenir au moins 9 % d'enfants ayant un QI < 80, ceci en considérant que l'intelligence et les performances en mathématiques sont deux variables indépendantes, ce qui n'est évidemment pas le cas. En d'autres termes, le taux d'enfants écartés par les auteurs est très nettement inférieur à ce qu'il devrait être et il est certain que le groupe d'enfants retenus comme dyscalculiques par Gross-Tsur et coll. (1996) contient un nombre important d'enfants dont le QI réel est inférieur à 80²⁵. Ceci est probablement dû à l'utili-

25. Le QI moyen des 140 enfants finalement retenus par les auteurs serait de 98,2 (QI verbal 94,7 ; QI performance 102,4). Ces valeurs sont totalement non plausibles si l'on songe que seuls 3 enfants ont été écartés parmi les 143 les plus faibles en arithmétique dans une cohorte de quelques 3 000 enfants. Pour fixer les idées, le score standardisé moyen aux *Progressive Matrices* des enfants en difficulté en arithmétique identifiés par Lewis et coll. (1994) qui représentent les 11 % les plus faibles en arithmétique de la population étudiée est de 75,3, soit 27 points d'écart avec le score non verbal moyen de la WISC-R rapporté par Gross-Tsur et coll (1996).

sation d'un test d'intelligence dont l'étalement remontait à plus de 20 ans au moment de l'étude.

Le travail de Lewis et coll. (1994) ne peut souffrir de ce défaut dans la mesure où la population d'étude, compte tenu de son ampleur, est en même temps utilisée par les auteurs comme population d'étalement. Pour cela, les auteurs procèdent à une normalisation des scores bruts ($m=10$, $\sigma=15$) de 1 056 enfants de 9 à 10 ans à des épreuves d'arithmétique et de lecture, ainsi qu'à un test d'aptitude intellectuelle non verbale (les *Coloured Progressive Matrices* de Raven, CPM, considérées comme un test d'intelligence saturé en facteur g). Sont retenus comme présentant des difficultés spécifiques en arithmétique les enfants présentant un score normalisé inférieur à 85 (soit au moins un écart-type en dessous de la moyenne) avec des scores d'aptitude non verbale et de lecture au moins égaux à 90 (qui ne se trouvent pas dans le quartile le plus faible). Les auteurs identifient selon les mêmes principes les enfants présentant des difficultés spécifiques en lecture ainsi que ceux qui ont des difficultés dans les deux domaines alors que leur score d'aptitude non verbale est normal (au moins 90). Comme l'indique le tableau 11.I, cette procédure conduit à identifier 38 enfants sur 1 056 qui présentent des difficultés en arithmétique. Cependant, 63 % d'entre eux présentent aussi des difficultés en lecture, les enfants présentant des difficultés spécifiques en arithmétique étant 14, soit 1,3 % de la population totale. Ici encore, les résultats contrastent avec ceux de Gross-Tsur et coll. (1996) qui relevaient seulement 17 % d'enfants dyslexiques dans leur population de dyscalculiques avec toutefois un critère extrêmement conservateur puisque les enfants devaient avoir des performances en lecture inférieures au percentile 5 pour être considérés dyslexiques. Il est intéressant de remarquer que dans l'étude de Lewis et coll. (1994), les enfants qui présentent des difficultés spécifiques en lecture sont trois fois plus nombreux que ceux qui présentent des difficultés spécifiques en arithmétique. Ainsi, dans la population présentant des difficultés en lecture malgré un score normal aux CPM, 36 % seulement présentent aussi un trouble de l'arithmétique.

D'autres données, non analysées par Lewis et coll. (1994) mais disponibles dans l'article, présentent un intérêt particulier. Les auteurs donnent en effet les effectifs d'enfants qui ont des difficultés d'apprentissage accompagnées de faibles capacités non verbales (score CPM < 90). Il est ainsi possible de calculer que 58 % des enfants présentant des difficultés spécifiques en arithmétique et 70 % des enfants présentant à la fois des difficultés en arithmétique et en lecture se révèlent avoir de faibles capacités aux CPM. À l'inverse, seuls 33 % des enfants ayant des difficultés spécifiques en lecture (non accompagnées de difficultés en arithmétique) sont dans ce cas. Une indépendance totale des scores conduirait à un taux de 25 % d'enfants ayant moins de 90 aux CPM. Ainsi, les difficultés en arithmétique, qu'elles soient spécifiques ou non, tendent à être liées à de faibles scores à l'épreuve d'intel-

ligence retenue, alors que les difficultés spécifiques en lecture ne le sont pratiquement pas.

Ainsi, la conclusion de Gross-Tsur et coll. (1996) selon laquelle le nombre d'enfants affectés par la dyscalculie est comparable à celui des enfants atteints de dyslexie est loin d'être garantie. Il semble au contraire que les rapports décrivant la dyscalculie comme une difficulté d'apprentissage peu fréquente ou en tous cas moins fréquente que les troubles d'apprentissage de la lecture soient plus près de la vérité (O'Hare et coll., 1991 ; *American Psychiatric Association*, 2004).

Une autre différence apparaît entre les populations présentant des difficultés spécifiques en arithmétique et en lecture concernant le sexe des enfants. Alors que Lewis et coll. (1994) observent, conformément à ce que l'on sait de la dyslexie, que le *ratio* garçons/filles est de 3,2/1 en ce qui concerne les difficultés spécifiques en lecture, les enfants souffrant de déficits spécifiques en arithmétique sont équitablement répartis entre les sexes (*sex ratio* 1/1) de même que le sont les enfants présentant des difficultés en arithmétique et en lecture (*ratio* 0,8/1). Le même phénomène est observé par Gross-Tsur et coll. (1996) ainsi que par Von Aster (1994). On ne sait quel crédit doit être apporté à Badian (1983) qui observe pour sa part un *ratio* garçons/filles de 1,7/1 pour les troubles isolés de la lecture, 2,2/1 pour ceux du calcul et 3/1 pour des troubles en arithmétique et en lecture. Il est probable que la dyscalculie affecte aussi fréquemment les garçons que les filles. De manière peu surprenante, Gross-Tsur et coll. (1996) rapportent que les enfants atteints de dyscalculie sont en général issus de classes sociales moins favorisées que les autres.

Tableau 11.1 : Caractéristiques et résultats des principales études de prévalence de la dyscalculie sur d'importantes populations d'enfants d'âge scolaire

Étude	N	Âges (années)	Critère d'inclusion	Critère d'exclusion	Dyscalculie (Taux en %)
Kosc, 1974	375	10-12	Batterie de tests <i>ad hoc</i>	QI < 90	6,4
Badian, 1983	1 476	7-14	Score < centile 20 <i>Stanford Achievement</i>	Aucun	6,4
Lewis et coll., 1994	1 056	9-10	Score standardisé < 85 <i>Group Mathematics Test</i>	Test PM Raven < 90	3,6
Gross-Tsur et coll., 1996	3 029	10-11	2 ans de retard Batterie de tests <i>ad hoc</i>	QI < 80	6,5
Desoete et coll., 2004	3 978	8-11	2 écarts-types de la moyenne Batterie de tests	Aucun	2,3 à 7,7 selon l'âge

Comorbidité

Le terme comorbidité réfère à la co-occurrence d'au moins deux troubles différents chez un même individu. Deux types de comorbidité ont été particulièrement étudiés en ce qui concerne la dyscalculie : la comorbidité avec d'autres difficultés d'apprentissage, et plus particulièrement avec la lecture et l'écriture d'une part, la comorbidité avec des atteintes chromosomales et des syndromes neurologiques d'autre part.

Dyscalculie et troubles de l'apprentissage du langage écrit et oral

Les données issues des études de prévalence permettent d'écarter l'hypothèse jadis émise de la dyscalculie comme trouble attribuable à un déficit général des processus langagiers (Cohn, 1971). Même s'ils sont peu nombreux, il existe des enfants qui ont de faibles scores en arithmétique alors que leurs performances en lecture sont normales. Toutefois, comme nous l'avons vu, la dyscalculie est fréquemment associée à des difficultés d'apprentissage en lecture. Gross-Tsur et coll. (1996) identifient 17 % d'enfants atteints de dyslexie dans une population d'enfants dyscalculiques, mais adoptent un critère extrêmement strict (score inférieur au 5^e percentile en lecture). Lewis et coll. (1994), pour leur part, relèvent 64 % de difficultés d'apprentissage de la lecture associées. Ostad (1998) relève quant à lui 51 % d'enfants présentant des difficultés en orthographe dans une population d'enfants dyscalculiques. Il est à noter que cette observation n'est pas isolée : Shalev et coll. (2005) identifient les difficultés en écriture comme un facteur de persistance de la dyscalculie au cours du développement. Dans bien des études, un examen approfondi des données fait souvent apparaître que les groupes présentés comme atteints spécifiquement de dyscalculie s'avèrent en réalité obtenir de faibles performances en lecture (Landerl et coll., 2004). En résumé, nombre d'enfants d'intelligence normale présentant des difficultés d'apprentissage de l'arithmétique présentent aussi des difficultés d'apprentissage du langage écrit. Toutefois, la dyscalculie existe aussi à titre de trouble isolé. Comme on le verra par la suite, il semble que les enfants présentant des difficultés spécifiques en arithmétique se distinguent de ceux présentant des difficultés dans les deux domaines. La plupart des études distinguant les deux populations font état de différences dans l'étendue et l'importance des troubles. Les enfants qui présentent une comorbidité avec des troubles de la lecture présentent un handicap plus important en arithmétique ainsi que dans les tests neurologiques que les enfants atteints de dyscalculie seule (Jordan et Montani, 1997 ; Shalev et coll., 1997 ; Jordan et Hanich, 2000 ; Fuchs et Fuchs, 2002). À l'exception notoire de Butterworth (2005) dans sa récente revue de question sur la dyscalculie développementale, tous les auteurs semblent partager ce constat. Les raisons de la fréquente comorbidité entre troubles de l'arithmétique et de la lecture demeurent cependant obscures. À l'issue de son étude

sur la comorbidité entre dyscalculie et problèmes en orthographe, Ostad (1998) conclut que le principal facteur expliquant la comorbidité observée est ce qu'il appelle une capacité générale (*general ability*), évaluée en utilisant 6 des 12 sub-tests de la WISC-R, c'est-à-dire le niveau intellectuel. De fait, dans de nombreuses études, les groupes présentant une comorbidité manifestent un niveau intellectuel inférieur (au moins de manière descriptive et parfois statistiquement significative) à celui des groupes présentant un déficit simple (Lewis et coll., 1994 ; Gross-Tsur et coll., 1996 ; Alarcon et coll., 1997 ; Fuchs et Fuchs, 2002).

On peut aussi supposer, ce qui n'est pas exclusif de l'hypothèse précédente, que troubles de l'apprentissage de l'arithmétique et troubles de la lecture peuvent dans certains cas être liés au même facteur de risque. Comme le fait remarquer Ostad (1998), il n'est par exemple pas déraisonnable de penser que des troubles du langage peuvent accroître les risques de difficultés d'apprentissage de l'arithmétique. On dispose justement d'une étude sur les acquisitions en arithmétique des enfants présentant un trouble développemental du langage (*developmental language disorder*). Manor et coll. (2000) ont comparé 45 enfants de 6 ans admis dans un programme visant à intégrer les enfants d'intelligence normale atteints de troubles du langage en classes maternelles à 45 enfants témoins appariés sur l'âge, le sexe, et la classe sociale. Les deux groupes sont soumis aux mêmes épreuves concernant la compréhension des principes régissant le dénombrement, les habiletés de comptage, la compréhension, la lecture et l'écriture des nombres, ou encore la résolution d'opérations. Sur toutes les épreuves, les enfants présentant des troubles du langage obtiennent de plus faibles performances que les enfants du groupe témoin. Lorsque l'effet du QI sur les scores en arithmétique est contrôlé, il apparaît que les enfants avec troubles du langage présentent une déficience en arithmétique qui va au-delà de ce qui pourrait être attendu à partir de leur QI.

En résumé, la comorbidité observée entre dyscalculie et difficultés d'apprentissage du langage écrit est importante. Ses causes ne sont pas clairement établies et pourraient comprendre entre autres l'impact du niveau intellectuel et l'existence d'éventuels troubles du langage.

Dyscalculie, troubles développementaux, syndromes neurologiques et atteintes chromosomales

De nombreuses études rapportent qu'en dehors des troubles des apprentissages, divers troubles, atteintes et syndromes s'accompagnent par ailleurs d'une dyscalculie. Parmi les syndromes les plus souvent évoqués, le trouble de déficit de l'attention/hyperactivité (TDAH) semble présenter une comorbidité particulière avec la dyscalculie. Shalev et son équipe ont à plusieurs reprises observé ce lien. Lors de l'étude princeps de Gross-Tsur et coll. (1996), les

auteurs observent que parmi les 140 dyscalculiques qu'ils ont isolés, un diagnostic probable de TDAH peut être porté pour 36 d'entre eux (26 %) dont 21 garçons à partir des réponses données par les parents et les enseignants au questionnaire comportemental de Conners. Lors des études de suivi de cette cohorte, les auteurs constateront que les troubles attentionnels sont un facteur de persistance de la dyscalculie (Shalev et coll., 2005), les problèmes attentionnels étant plus sévères chez les enfants dont la dyscalculie perdure au fil des années (Shalev et coll., 1998). Shalev et coll. (1995) ont comparé leur population de dyscalculiques, alors âgés en moyenne de 11 ans, avec un groupe d'enfants normaux et un groupe d'enfants présentant des troubles psychiatriques. Les enfants dyscalculiques présentent plus de troubles attentionnels que ceux des autres groupes bien que leur niveau d'anxiété et de dépression soit normal. Les troubles de l'attention constituent d'ailleurs un des sous-types de la classification des dyscalculies proposée par Badian (1983). Corrélativement, il a aussi été montré que les enfants présentant un TDAH ont un risque élevé de difficultés en arithmétique (Ackerman et coll., 1986). Les enfants suivant un traitement médical peuvent voir leurs performances en arithmétique s'améliorer. Toutefois, comme le notent Gross-Tsur et coll. (1996), on ne sait pas si la médication a pour effet d'aider les enfants à apprendre et récupérer les faits arithmétiques ou plus simplement à éviter les erreurs dues à l'inattention et l'impulsivité. En outre, on ne sait pas si la dyscalculie est causée par le TDAH ou si tous les deux sont des symptômes d'un dysfonctionnement cérébral sous-jacent.

Un autre désordre développemental dans lequel la dyscalculie serait une caractéristique majeure est le syndrome de l'hémisphère droit. Gross-Tsur et coll. (1993) rapportent une étude de Weintraub et Mesulam (1983) décrivant un syndrome comportemental qui débute tôt dans l'enfance et se caractérise par des difficultés émotionnelles et interpersonnelles, des troubles visuo-spatiaux et des signes de dysfonctionnement de l'hémisphère droit, le tout associé à des difficultés d'apprentissage en arithmétique. De même, Rourke (1993) décrit à plusieurs reprises des cas d'enfants atteints spécifiquement de dyscalculie et qui auraient par ailleurs des troubles liés à un dysfonctionnement de l'hémisphère droit entraînant des déficiences perceptivo-tactiles et psychomotrices ainsi que des difficultés d'organisation spatiale. Selon Rourke (1993), certains enfants dyscalculiques présenteraient ainsi un syndrome de déficience des apprentissages non verbaux (*Non verbal Learning Disabilities syndrom* : NLD) s'étendant à la formation de concepts ou encore à des déficits adaptatifs dans le domaine socio-émotionnel (adaptation à la nouveauté, compétences sociales, stabilité émotionnelle). Nichelli et Venneri (1995) rapportent le cas d'un jeune adulte de 22 ans présentant des difficultés en arithmétique, des déficits visuo-spatiaux et des difficultés émotionnelles alors que les aspects verbaux sont remarquablement préservés. La tomographie par émission de positron révèle des anomalies de fonctionnement de l'hémisphère droit.

Deux désordres génétiques sont connus pour avoir des phénotypes cognitifs associés à des difficultés d'apprentissage des mathématiques : les syndromes de Turner et de l'X fragile. Le syndrome de Turner résulte de l'absence partielle ou complète de l'un des deux chromosomes X normalement présents chez les filles. Bien que ses effets sur le niveau intellectuel global soient minimes, les scores de QI verbal sont de 8 à 24 points supérieurs aux scores performance (Ballotin et coll., 1998). Dans une étude comparant les acquisitions scolaires de filles atteintes ou non du syndrome de Turner, Rovet (1993) relève que les premières obtiennent de plus faibles scores que les secondes en lecture mais que les différences sont encore plus marquées en arithmétique : 55 % des filles atteintes du syndrome se situent dans le quartile inférieur d'une épreuve standardisée contre 7 % du groupe témoin. Le retard affecte à la fois les opérations, la résolution de problèmes et la compréhension des concepts liés au nombre (Rovet et coll., 1994). L'existence d'un déficit en géométrie est moins sûre, certaines études en faisant état (Mazocco, 2001) alors que d'autres ne le retrouvent pas (Rovet et coll., 1994). Pour l'heure, il est impossible d'affirmer qu'il existe certains aspects des activités numériques qui seraient spécifiquement affectés alors que d'autres seraient préservés chez les filles atteintes du syndrome de Turner (Mazocco et McCloskey, 2005). Bien que dyscalculie et troubles de la lecture soient fréquemment associés comme nous l'avons vu précédemment, les filles atteintes du syndrome de Turner n'ont pas davantage de difficultés en lecture que l'ensemble de la population. De même, on ne relève pas de problèmes de langage, à l'exception toutefois de la tâche de dénomination rapide (*Rapid Automated Naming*, RAN) dans laquelle les filles avec un syndrome de Turner sont plus lentes (Temple et Sherwood, 2002). Ce point est intéressant à souligner parce qu'on a par ailleurs montré que cette même vitesse de dénomination est corrélée avec les performances en arithmétique dans une population tout-venant (Mazzocco et Myers, 2003) et qu'elle l'est aussi avec les performances en lecture. Dans leur revue de questions sur le sujet, Mazocco et McCloskey (2005) relèvent que parmi les fonctions cognitives liées aux activités numériques, le syndrome de Turner s'accompagne d'un déficit des fonctions exécutives et du traitement en continu de l'information en mémoire de travail, alors que les déficits en mémoire à court terme sont moins clairs, certaines études en faisant état (Rovet, 1993), d'autres non (Temple et Sherwood, 2002). De même, plus que d'un déficit de la mémoire visuelle ou spatiale en elle-même, les sujets souffriraient plutôt d'une faible capacité en mémoire de travail visuo-spatiale. En outre, on observe les déficits visuo-perceptif et visuo-moteur (Mazzocco, 2001).

À l'inverse du syndrome de Turner, le syndrome de l'X fragile s'accompagne d'un retard mental sans différence notable entre les QI verbal et performance. Alors que ce retard mental affecte 100 % des garçons porteurs du syndrome, il n'affecte que 50 % des filles. Les filles sans retard mental présentent un phénotype cognitif proche de celui des enfants atteints du syn-

drome de Turner, avec des performances en arithmétique inférieures aux performances en lecture, beaucoup de filles X-fragile sans retard mental ne présentant pas de difficultés en lecture. Selon Bennetto et coll. (2001), un déficit des fonctions exécutives est à la base de leur phénotype cognitif. Il est à noter que les déficits visuo-perceptif et visuo-moteur présents dans le syndrome de Turner ne s'observent pas dans le syndrome de l'X fragile (Mazzocco, 2001). Cette différence avec le syndrome de Turner fait écho à la distinction souvent faite entre difficultés en arithmétique sous-tendues ou en tous cas s'accompagnant d'un déficit spatial et celles qui en sont indépendantes.

Une autre atteinte neurodéveloppementale présentant un intérêt théorique particulier en ce qui concerne les sous-types de la dyscalculie est le spina bifida myéломéningocole (Wills et coll., 1990 ; Barnes et coll., 2005). De nombreux enfants présentant un spina bifida rencontrent d'importantes difficultés en arithmétique associées ou non avec des difficultés en lecture alors que les difficultés isolées en lecture sont rares. Environ 40 % d'entre eux sont dyscalculiques, 20 % présentant un trouble spécifique de l'arithmétique. Par ailleurs, ces difficultés isolées en arithmétique sont associées à des troubles visuo-spatiaux. En outre, les anomalies du cerveau entraînées par le spina bifida associent souvent la planification motrice, la motricité fine et plus particulièrement le contrôle des doigts avec des dommages des lobes pariétaux. Or, on verra que Butterworth (1999) voit dans l'utilisation des doigts pour compter l'origine des représentations numériques dans les lobes pariétaux à proximité du cortex prémoteur intéressant les doigts. L'étude des enfants atteints de spina bifida pourrait donc constituer un paradigme intéressant pour la compréhension des relations entre motricité fine et habiletés en calcul (Fayol et coll., 1998). En fait, Barnes et coll. (2005) observent que des enfants atteints de spina bifida ne commettent pas dans la résolution d'opérations posées plus d'erreurs « visuo-spatiales » que des enfants témoins (mauvais alignement des chiffres dans les colonnes, oublis de colonnes...). Ils commettent en revanche plus d'erreurs procédurales. Ces erreurs pourraient provenir selon les auteurs de la lenteur avec laquelle leurs sujets expérimentaux retrouvent les faits numériques en mémoire. Des analyses de régression ont permis de vérifier que les performances aux opérations complexes chez les enfants atteints de spina bifida étaient liées à leurs habiletés motrices fines mais pas à leurs habiletés visuo-spatiales qui apparaissaient indépendantes des habiletés à effectuer des calculs sur des nombres à plusieurs chiffres. Les auteurs ont aussi vérifié que les performances des enfants de 3 ans avec spina bifida dans les activités de dénombrement étaient liées à leurs habiletés motrices fines.

La dyscalculie est aussi un des critères majeurs pour diagnostiquer le syndrome de Gertsman (Gertsman, 1940). Outre la dyscalculie, ce syndrome associe une agnosie digitale, les enfants étant incapables d'identifier et montrer un doigt en particulier sur eux-mêmes ou une autre personne, une agra-

phie sans alexie ainsi que des problèmes d'orientation visuo-spatiale avec des confusions droite-gauche sur le corps propre ou celui d'une autre personne. Benton (1987) a suggéré que cette association de symptômes trouve sa source dans la proximité des aires cérébrales qui sous-tendent les diverses fonctions affectées, toutes étant regroupées dans la zone occipito-pariétale, et plus particulièrement dans le gyrus angulaire gauche. Cette association de symptômes liés à une acalculie fait écho à ce qui a été rapporté plus haut concernant le spina bifida myéломéningocole et l'association qui semble exister entre certaines habiletés numériques et le développement neuropsychologique concernant la motricité fine.

Isaacs et coll. (2001) ont étudié un groupe d'enfants nés prématurés avec un poids inférieur à 1 500 g. Beaucoup de ces enfants présentent une dyscalculie et par ailleurs ont des cortex pariétaux gauches plus petits que ceux qui n'ont pas de difficultés. D'autres troubles enfin ont été évoqués comme particulièrement propices à l'apparition d'une dyscalculie. Citons l'épilepsie (Seidenberg et coll., 1986), la phénylcétonurie (Pennington, 1991) ou encore le syndrome de Williams (Ansari et Karmiloff-Smith, 2002).

Héritabilité

Dans la définition qu'il donnait de la dyscalculie, Kosci (1974) faisait l'hypothèse d'un trouble congénital ou héréditaire. Trois études sont récemment venues confirmer cette supposition. Tout d'abord, Light et DeFries (1995) ont conduit une étude sur 148 paires de jumeaux monozygotes (MZ) et 111 paires de jumeaux dizygotes (DZ) entre 8 et 20 ans dans lesquelles un des membres de la paire au moins était atteint de troubles d'apprentissage de la lecture. Cette étude est pertinente ici parce que outre la recherche chez l'autre jumeau d'éventuels troubles de la lecture, les auteurs relèvent aussi les troubles d'apprentissage des mathématiques. Ils font l'hypothèse que les déficits en mathématiques souvent observés chez les sujets ayant des difficultés en lecture sont dus, au moins en partie, à des facteurs génétiques qui influencent aussi leurs performances en lecture. De fait, les auteurs observent que 49% des jumeaux MZ et 32 % des jumeaux DZ présentent une déficience en mathématiques. La différence significative entre les deux taux suggère que la comorbidité entre troubles d'apprentissage de la lecture et de l'arithmétique est due au moins en partie à des influences génétiques. Selon les résultats, les influences génétiques et environnementales contribuent de façon équivalente à la covariance entre scores en lecture et en arithmétique dans les paires de jumeaux présentant une déficience en lecture. Une étude ultérieure de Alarcon et coll. (1997) utilisant toujours la méthode des jumeaux porte spécifiquement sur la dyscalculie (désignée par les auteurs comme *mathematic disabilities*). Les auteurs identifient 40 paires de jumeaux MZ et 23 paires de jumeaux DZ dans les-

quelles un au moins des deux jumeaux présente une dyscalculie. Les critères utilisés sont un score normalisé inférieur de 1,5 écart-type à la moyenne d'un groupe témoin dans une épreuve de mathématiques, un QI verbal ou performance supérieur à 90 et une absence de problèmes comportementaux, neurologiques ou émotionnels. En outre, les auteurs distinguent les jumeaux probants présentant un trouble spécifique des mathématiques (MD) et ceux présentant en outre un déficit en lecture (MD-RD). Dans les paires de jumeaux étudiés, 58 % des jumeaux MZ et 39 % des jumeaux DZ présentaient aussi une déficience en mathématiques. Les analyses de régression indiquent que 40 % du déficit sont dus à des facteurs héréditaires. En ce qui concerne l'étiologie différentielle des déficits en mathématiques spécifiques ou associés à des déficits en lecture, les auteurs observent que le déficit de type MD-RD semble légèrement plus héréditaire que le déficit spécifique de type RD sans pour autant que la différence soit significative, ce qui peut être dû à la faible taille des échantillons.

Une étude plus récente conduite par Shalev et coll. (2001) établit que la dyscalculie est un trouble familial. Les auteurs reprennent la cohorte de 140 enfants dyscalculiques étudiés par Gross-Tsur et coll. (1996) et isolent 39 enfants ne présentant pas de troubles associés (dyslexie, dysgraphie, ou de trouble déficitaire de l'attention). Les membres des familles de ces enfants (43 pères ou mères, 90 frères ou sœurs, 16 parents au second degré) sont soumis à des épreuves standardisées de mathématiques, de lecture, ainsi qu'à une version abrégée de test d'intelligence (WISC-R ou WAIS) et divers autres tests. Les résultats sont éloquentes : plus de la moitié des parents et frères et sœurs sont classés comme dyscalculiques (67 %, 41 %, 53 % et 52 % des mères, pères, frères et sœurs respectivement). Les auteurs considèrent leurs résultats comme d'autant plus robustes que la propension à présenter une dyscalculie pour les membres des familles serait indépendante, comme la dyslexie, du QI. Toutefois, les réserves émises plus haut sur les mesures de QI dans les études de Shalev s'appliquent ici aussi. Les QI moyens des groupes de parents ou de frères et sœurs présentant ou non une dyscalculie sont tous supérieurs à 108 (une moyenne atteint même 116 !) et bien que de manière non significative, les individus dyscalculiques ont dans tous les groupes des QI moyens inférieurs aux autres (lorsque la population est considérée dans son ensemble, on peut vérifier par le calcul que la différence est significative).

En résumé, les études d'héritabilité font apparaître que la dyscalculie est un trouble dû au moins en partie à des facteurs génétiques dans des proportions comparables à ce qui est observé pour la dyslexie. L'étude de Alarcon et coll. (1997) suggère a minima que la dyscalculie comme trouble isolé n'est pas plus et pourrait même être moins héréditaire que lorsqu'il existe une comorbidité avec la dyslexie. Ainsi, la moitié des parents et frères et sœurs d'enfants dyscalculiques présentent aussi d'importantes difficultés en arithmétique.

Nature, causes et évolution des troubles

La plus grande partie des travaux sur la dyscalculie et les difficultés d'apprentissage de l'arithmétique sont consacrés à la description et à l'analyse des troubles afin d'en cerner les causes et déterminants. Si la description des troubles et de leur évolution avec l'âge est relativement consensuelle, on verra que les avis sur leur origine divergent fortement et qu'à l'heure actuelle, les causes de la dyscalculie demeurent encore obscures.

Nature des troubles

Au-delà des faibles performances scolaires qui se reflètent dans les scores aux échelles d'aptitude, les chercheurs ont tenté de pointer les compétences et connaissances faisant particulièrement défaut aux dyscalculiques dans le domaine du nombre. Comme de nombreux auteurs l'ont souligné, ces recherches ont suivi la voie tracée par l'étude des habiletés numériques chez le jeune enfant en psychologie cognitive. Il est en effet apparu que les enfants développent, avant leur entrée à l'école primaire, des connaissances mathématiques informelles qui guident les apprentissages ultérieurs (Gelman et Gallistel, 1978 ; Fayol, 1990 ; Dehaene, 1997). Par exemple, les jeunes enfants semblent comprendre les principes de base du dénombrement (Gelman et Gallistel, 1978 ; Gelman et Meck, 1983 ; Briars et Siegler, 1984), développent spontanément des stratégies de résolution des additions et soustractions simples (Groen et Resnick, 1977 ; Carpenter et Moser, 1984 ; Siegler, 1987) et même les bébés semblent présenter une sensibilité au nombre et à ses transformations (Starkey et Cooper, 1980 ; Antell et Keating, 1983 ; Wynn, 1992). Il a été ainsi établi que les troubles dont souffrent les enfants dyscalculiques affectent les aspects procéduraux mais aussi conceptuels des activités de calcul et de comptage ainsi que la mémorisation des faits numériques qui résulte habituellement de ces activités.

En ce qui concerne les procédures spontanément mises en œuvre dans les calculs les plus simples (combien font $5+3$?), il a été maintes fois démontré que les enfants dyscalculiques utilisent plus souvent et plus longtemps que les enfants normaux des stratégies primitives de comptage (Ostad, 1997). Dès 1975, Svenson et Broquist observaient que des enfants en difficulté en mathématiques (*mathematically disabled*, MD) de 10,6 ans à 13,7 ans étaient plus lents pour résoudre des additions simples que des enfants normaux de même niveau (et donc plus jeunes). Geary (1990) a comparé les stratégies mises en œuvre par des enfants de CP et CE1 soit normaux soit présentant des difficultés en mathématiques (MD) dans la résolution d'additions simples. Il est apparu que les enfants MD utilisaient les mêmes stratégies que les enfants normaux (comptage sur les doigts, comptage verbal, récupération directe du résultat en mémoire) mais commettaient plus d'erreurs dans la mise en œuvre des procédures ainsi que lorsqu'ils récupéraient le résultat en

mémoire. Plus souvent que les autres, ils utilisaient une stratégie immature consistant à tout compter (pour effectuer $4+2$, compter 1, 2, 3, 4, 5, 6 plutôt que de commencer à 4 et de poursuivre par 5 et 6). En outre, leurs temps de réponses étaient plus variables que ceux des enfants normaux. Ces résultats suggéraient chez les enfants MD un déficit fonctionnel consistant en de faibles habiletés procédurales et une représentation des résultats en mémoire pour le moins atypique. Les mêmes enfants ont été revus 10 mois plus tard par Geary et coll. (1991). Alors que les enfants normaux changent progressivement de stratégie pour recourir de plus en plus souvent à la récupération directe du résultat en mémoire, les enfants MD ne présentent aucun changement dans les stratégies utilisées. C'est, selon les auteurs, l'incapacité à mémoriser et à retrouver les résultats qui contraint les enfants MD à recourir à des stratégies de comptage que les enfants normaux abandonnent progressivement. Le même constat est effectué par Geary et Brown (1991) sur des enfants plus âgés (CE2 et CM1). Là encore, alors que les enfants normaux utilisent majoritairement une stratégie de récupération directe du résultat en mémoire et que les plus doués d'entre eux y recourent presque systématiquement, les enfants MD continuent à utiliser préférentiellement les stratégies de comptage verbal et même parfois de comptage sur les doigts. La conclusion des auteurs est ici encore que les enfants MD souffrent d'une organisation défaillante des faits additifs en mémoire. De tels résultats avaient déjà été obtenus par Geary et coll. (1987) par une méthode plus indirecte d'analyse de temps de vérifications d'additions justes ou fausses qui suggéraient que des enfants MD de CE1, CM1 et 6^e recouraient davantage au comptage qu'à la récupération et ne manifestaient pas, dans leur choix de stratégie, le passage à la récupération caractéristique du développement normal.

Ces études, conduites aux alentours des années 1990, portaient sur des groupes d'enfants MD sans prise en compte de possibles troubles associés en lecture. Des études plus récentes distinguant des enfants ayant seulement des troubles en mathématiques (MD) de ceux ayant aussi des troubles en lecture (MD-LD) montrent que l'usage de stratégies primitives comme le comptage sur les doigts s'observe dans les deux groupes (Jordan et Montani, 1997). En revanche, les enfants MD-LD commettent plus d'erreurs que les enfants MD dont les taux de performance rejoignent ceux des enfants normaux pour peu qu'on leur laisse le temps de mettre en œuvre leurs procédures de comptage. Les enfants MD-LD présentent des performances toujours inférieures aux enfants témoins même lorsqu'ils ont tout le temps qu'ils souhaitent pour effectuer les calculs. Ce résultat est retrouvé par Hanish et coll. (2001). Une étude longitudinale couvrant les deux premières années de primaire (Geary et coll., 2000) précise ce tableau et révèle qu'à la fin de la seconde année, les enfants souffrant seulement de difficultés en mathématiques se rapprochent fortement des enfants normaux en ce qui concerne l'usage de la stratégie dite Min (pour minimum) qui est la plus sophistiquée des stratégies de comptage alors que ce progrès ne s'observe pas chez les enfants MD-LD.

En résumé, l'ensemble des études ayant abordé le développement des stratégies de résolution des additions simples, mais aussi des soustractions (Ostad, 1999 et 2000), convergent vers un même constat qui est que les enfants dyscalculiques se distinguent des autres par l'usage plus fréquent et moins précis de stratégies de comptage primitives et par une difficulté notoire à accéder à la stratégie de récupération directe du résultat en mémoire. Ce retard semble cependant plus marqué pour les enfants qui présentent en outre des difficultés en lecture (Jordan et Hanish, 2000). Les enfants ne présentant que des difficultés en arithmétique ne se distinguent pas des enfants tout-venant en ce qui concerne les stratégies de résolution des opérations, leur déficit lié aux opérations semblant circonscrit à la récupération des faits numériques en mémoire (Jordan et Montani, 1997).

Les enfants développent les stratégies de résolution des opérations simples dont nous venons de parler à partir de leurs connaissances concernant le comptage. Il semble que les activités de comptage des jeunes enfants soient guidées par des contraintes que Gelman et Gallistel (1978) ont décrites comme autant de principes. On distingue ainsi un principe de correspondance terme à terme (un mot et un seul est assigné à chaque objet dénombré : « un », « deux », « trois », ...), un principe d'ordre stable (ces mots doivent toujours être produits dans le même ordre), un principe de cardinalité (le dernier mot prononcé indique le cardinal de la collection), un principe d'abstraction (des objets même très hétérogènes peuvent être regroupés et comptés), et enfin un principe de non pertinence de l'ordre qui fait que les objets à dénombrer peuvent l'être dans n'importe quel ordre sans affecter le résultat. Gelman et Gallistel (1978) ont même suggéré que les trois premiers principes seraient innés et constitueraient les bases de la connaissance du comptage. Toutefois, les enfants s'appuient aussi sur l'observation des activités de dénombrement pour en induire des connaissances (Briars et Siegler, 1984 ; Fuson, 1988). Ce processus inductif renforce probablement les règles décrites par Gelman et Gallistel si elles lui préexistent mais entraîne aussi l'abstraction de pseudo-règles dérivées de régularités non essentielles. Par exemple, beaucoup de jeunes enfants de 5 ans pensent qu'un dénombrement correct nécessite de compter en succession immédiate les objets proches sans sauter d'une extrémité à l'autre de la collection (règle de proximité), ou encore que le dénombrement doit toujours être effectué dans la même direction, d'une extrémité de la collection à l'autre (par exemple de gauche à droite). De manière intéressante, les enfants dyscalculiques distinguent moins bien que les autres les principes essentiels des pseudo-principes. C'est ce qu'ont montré Geary et coll. (1992) qui demandaient à des enfants de CP d'observer une poupée qui dénombrerait des collections soit de manière correcte, soit en violant tantôt les principes essentiels décrits par Gelman et Gallistel (1978), tantôt les pseudo-principes décrits par Briars et Siegler (1984). Cependant, les difficultés des enfants dyscalculiques dans les habiletés élémentaires de comptage et autres ne doivent pas être exagérées. Étudiant 143 enfants de 11 et 12 ans diagnostiqués comme dyscalculiques,

Gross-Tsur et coll. (1996) observaient que les faiblesses les plus prononcées se manifestaient dans les domaines des calculs complexes et de la connaissance des faits arithmétiques alors que les domaines de la compréhension (comparaisons de quantités ou de nombres à un ou plusieurs chiffres) et de la production des nombres (comptage, écriture de nombres) étaient relativement préservés. Un suivi longitudinal de la même cohorte 3 années plus tard (Shalev, et coll., 1998) indiquait d'ailleurs que les enfants dyscalculiques tendent à rattraper progressivement leur retard dans les activités les plus simples (la résolution des additions à 14 ans). On notera toutefois qu'une étude récente rapporte des difficultés dans les activités numériques les plus élémentaires chez des enfants dyscalculiques de 8 et 9 ans (Landerl et coll., 2004). Cependant, la portée de ce résultat pourrait être atténuée par le fait qu'il ne concerne qu'un groupe restreint de 10 sujets classés comme dyscalculiques sur la base d'épreuves chronométrées d'arithmétique mentale (temps de réaction ou taux d'erreurs supérieur de trois écarts-types à celui de sujets témoins sur des additions, soustractions et multiplications). Les enfants dyscalculiques sont plus lents que les témoins pour lire, écrire et comparer les nombres de même que pour dénombrer des collections. En outre, ils présentent une pente de *subitizing*²⁶ plus prononcée que les témoins. Toutefois, ayant été constitué sur la base de temps de réaction particulièrement élevés dans la récupération de faits numériques en mémoire, il n'est peut-être pas étonnant que le groupe des enfants dyscalculiques étudiés par Landerl et coll. (2004) soit aussi plus lent que le groupe témoin dans des activités plus élémentaires. Ce point est cependant primordial et mérite un approfondissement des recherches. En effet, les auteurs proposent que la dyscalculie résulte d'un déficit spécifique de la représentation et du traitement des informations numériques provenant du développement anormal des aires cérébrales normalement dévolues à ces fonctions (les lobes pariétaux et plus spécifiquement selon Dehaene et coll. (2003), le sillon intra-pariétal). On peut toutefois noter que parmi les rares études se penchant sur les processus élémentaires tels que la comparaison de nombres, celle de Geary et coll. (2000) ne confirme pas les conclusions de Landerl et coll. (2004). Alors que ces derniers ne trouvent pas de différence entre les enfants MD et les enfants MD-LD, Geary et coll. (2000) observent d'une part qu'à 7 ans les enfants MD-LD ont de plus faibles performances dans une tâche de comparaison que les MD et d'autre part que deux ans plus tard, les enfants MD ne présentent plus de différence avec les enfants normaux alors que les enfants MD-LD présentent toujours des performances plus faibles. Les auteurs en concluent

26. On appelle *subitizing* le processus d'aperception rapide de petites quantités (de 1 à 4) sans comptage. Bien que ces petites quantités puissent être énumérées sans être comptées, les temps de réponse augmentent très légèrement avec le nombre d'objets présentés. Chaque objet supplémentaire se traduit par un accroissement du temps de réponse de 40 à 100 ms : c'est la pente du *subitizing*.

que « les difficultés dans la compréhension des nombres chez les enfants MD-LD ne sont pas manifestes chez les enfants MD, ce qui suggère que de telles difficultés ne sont pas une caractéristique essentielle de la dyscalculie » (Geary et coll., 2000).

Le processus sans doute le plus étudié dans les acquisitions numériques scolaires est le changement dans le type de stratégies utilisées par les enfants pour résoudre les additions simples, des stratégies algorithmiques de comptage à la récupération directe du résultat en mémoire (Aschcraft, 1982 ; Carpenter et Moser, 1984 ; Siegler et Shrager, 1984 ; Geary, 1994 ; Siegler, 1996). On explique ce changement par un processus d'apprentissage associatif. La répétition par des procédures algorithmiques des mêmes calculs conduirait à l'association en mémoire des problèmes et du résultat obtenu. Par exemple, la résolution correcte de $5+3$ à l'aide de la stratégie minimum (partir de 5 et avancer de 3 pas dans la chaîne numérique) conduirait à associer $5+3$ et 8 en mémoire. Chaque occurrence de ce calcul renforcerait la trace mnésique jusqu'à ce que la réponse soit automatiquement activée et récupérée dès présentation du problème. Cette stratégie de récupération est bien entendu la plus rapide et la plus efficace, bien qu'elle ne s'applique réellement qu'aux opérations portant sur des nombres à un chiffre (additions et multiplications). Aschcraft (1982) a établi que la transition des procédures algorithmiques à la récupération en mémoire pour les additions simples se produit durant le CE2. Selon Geary (2004), le résultat le plus régulièrement obtenu dans l'étude de la dyscalculie est que les enfants dyscalculiques diffèrent des autres par leurs difficultés à retrouver en mémoire les faits arithmétiques. Ces difficultés de récupération sont présentes chez tous les enfants MD et persistent au moins tout au long de la scolarité primaire (Jordan et Montani, 1997 ; Ostad, 1997, 1999 et 2000). Quand ces enfants retrouvent des réponses en mémoire, celles-ci sont plus souvent fausses que chez les enfants se développant normalement avec des patterns de temps de réponses atypiques (Geary, 1990 ; Geary et Brown, 1991). À titre d'exemple, Shalev et coll. (2005) testent à 17 ans les sujets dyscalculiques étudiés par Shalev et coll. (1998) 3 ans plus tôt et par Gross-Tsur et coll. (1996) 6 ans plus tôt. Même à 17 ans, 51 % d'entre eux contre 17 % des témoins demeurent incapables de donner le résultat de 7×8 . L'étude longitudinale de Jordan et coll. (2003a) a montré que ce déficit évolue peu avec l'âge. Ayant sélectionné un groupe d'enfants pour leur faible maîtrise des faits numériques, les auteurs observent qu'un an et demi plus tard (entre le début du CE1 et la fin du CE2) les enfants n'ont pratiquement pas progressé dans ce domaine alors qu'ils manifestaient un développement normal dans d'autres secteurs des activités numériques tels que la résolution de problèmes à énoncés verbaux ou même la résolution d'opérations lorsque l'enfant n'est pas contraint de récupérer le résultat en mémoire mais peut utiliser ses doigts pour compter.

Les faits arithmétiques étant stockés sous une forme verbale (Dehaene, 1992), il a été suggéré que les difficultés dans leur récupération et les diffi-

cultés en lecture partageaient une base commune liée à des traitements phonologiques défectueux (Geary, 1993 ; Hanish et coll., 2001). Toutefois, les résultats de Jordan et coll. (2003a) contredisent cette hypothèse, les enfants ayant des difficultés de mémorisation et de récupération en mémoire des faits arithmétiques ne se distinguant pas des autres sur un test de lecture rapide de mots ou encore un test plus global de lecture. Cette conclusion est confirmée par une autre étude des mêmes auteurs (Jordan et coll., 2003b) qui comparent des enfants MD à des enfants ayant des difficultés isolées en lecture (LD), des enfants ayant des difficultés dans les deux domaines (LD-MD) et enfin des enfants ayant des performances normales. Les deux groupes MD (MD et MD-LD) ont des performances inférieures aux deux autres groupes en ce qui concerne la récupération des faits arithmétiques mais ne diffèrent pas entre eux, suggérant que le trouble est indépendant d'éventuelles difficultés en lecture.

On a aussi supposé que ces difficultés de récupération étaient liées à une incapacité à résister aux interférences produites par d'autres résultats associés aux opérandes. Barrouillet et coll. (1997) ont montré que l'organisation en mémoire des tables de multiplication ne diffère pas entre les enfants en difficulté d'apprentissage et les enfants tout-venant, mais que les plus faibles performances des premiers résultent de leur plus grande sensibilité aux interférences. Ces enfants avaient par exemple moins de difficultés à sélectionner le résultat de 4×6 parmi des distracteurs faiblement interférents (24 environné de 22, 23, et 26, aucun de ces nombres n'apparaissant dans la table de Pythagore) que parmi des distracteurs hautement interférents appartenant à des tables de l'un ou l'autre des deux opérandes (30, 18, 28). Toutefois, cette étude ne portait pas sur des enfants dyscalculiques au sens strict puisqu'il s'agissait d'adolescents scolarisés en SEGPA pour lesquels le diagnostic de déficience intellectuelle légère ne peut a priori être écarté. Ce résultat a été cependant répliqué par Geary et coll. (2000) chez des sujets MD résolvant des additions. Dans une tâche où les enfants devaient uniquement utiliser la récupération en mémoire pour résoudre des additions, les enfants MD et MD-LD, mais aussi les enfants LD commettaient plus d'erreurs que les enfants normaux même lorsque les différences de QI étaient contrôlées. De manière intéressante, l'erreur la plus fréquente consistait à produire une réponse associée dans la chaîne numérique à l'un des deux opérandes et activée automatiquement. Par exemple, des erreurs de récupération courantes pour $6+2$ étaient 7 ou 3, les nombres qui suivent directement les opérandes dans la chaîne numérique. Des phénomènes semblables sont rapportés par Hanish et coll. (2001). Selon Barrouillet et coll. (1997) qui s'inspirent du modèle de Conway et Engle (1994), ces difficultés à résister aux interférences seraient imputables à de faibles capacités en mémoire de travail affectant principalement l'étape de sélection de la réponse. D'autres auteurs ont aussi émis l'hypothèse que les difficultés de récupération résultent de faibles capacités en mémoire de travail (Geary, 1990 ; Ostad, 1998).

Enfin, ces difficultés de récupération pourraient aussi provenir de problèmes développementaux affectant des systèmes neurocognitifs modulaires, indépendants de la mémoire sémantique ou de la mémoire de travail, spécialisés dans la représentation et la récupération des connaissances arithmétiques (Butterworth, 1999 ; Temple et Sherwood, 2002). Ce problème sera plus amplement abordé plus loin.

En résumé, l'ensemble des études concernant les déficits des enfants dyscalculiques indiquent que ceux-ci présentent un retard de développement dans le domaine des procédures de comptage permettant les calculs les plus élémentaires (additions et soustractions). Ils recourent plus souvent que les autres à des stratégies primitives et au comptage sur les doigts, le passage à la récupération directe des résultats en mémoire étant largement retardé. Ces déficits pourraient trouver leur origine dans une mauvaise compréhension des principes régissant les activités de dénombrement, lesquelles constituent la matrice de toutes les acquisitions numériques ultérieures. Les difficultés des dyscalculiques à récupérer les faits arithmétiques en mémoire sont unanimement reconnues et décrites avec une remarquable constance (apparition tardive, utilisation plus rare que chez les enfants normaux et conduisant à davantage d'erreurs avec une variabilité atypique des temps de récupération). Ces retards ont bien entendu un effet délétère sur les activités plus complexes de résolution de problèmes. Les dyscalculiques se caractérisent aussi par des difficultés dans la résolution des opérations impliquant de grands nombres et l'utilisation des retenues (Bryant et coll., 2000). Ces difficultés semblent cependant plus marquées pour les enfants qui présentent en outre des difficultés en lecture (Geary et coll., 2000 ; Jordan et Hanish, 2000 ; Fuchs et Fuchs, 2002). On a vu que, dans le domaine de la résolution des opérations, les enfants ne présentant que des difficultés en arithmétique ne se distinguent pas des enfants tout-venant en ce qui concerne les stratégies, leur déficit semblant circonscrit à la récupération des faits numériques en mémoire (Jordan et Montani, 1997). Comme nous l'avons vu, les études qui distinguent les enfants MD des enfants MD-LD font état chez ces derniers de troubles plus envahissants dont l'intensité augmente avec la complexité des opérations ou des problèmes qui leur sont proposés. Certaines études rapportent que les enfants présentant des difficultés spécifiques en mathématiques souffrent de troubles plus ciblés. Hormis la récupération des faits arithmétiques, la nature de ces déficits semble varier d'une étude à l'autre. Tantôt limités dans certaines études à la résolution des problèmes verbaux les plus complexes (Jordan et Hanish, 2000), ils s'étendent dans d'autres au calcul par approximation ou aux traitements visuo-spatiaux (Hanich et coll., 2001). En revanche, Fletcher (2005) qui compare les deux populations MD et MD-LD n'observe pas de différence de profil, les enfants MD-LD présentant juste un déficit plus prononcé. Ces fluctuations sont probablement dues à l'étendue et à la variété des activités numériques, les déficits ne pouvant être identifiés, par définition, que sur les activités faisant

l'objet d'une investigation. En tout état de cause, on peut retenir la conclusion que les enfants présentant un retard en mathématiques et en lecture diffèrent des enfants présentant des difficultés spécifiques en mathématiques par l'intensité plus que par la nature des déficits. Il semble ne pas exister de différence notoire de profil entre les difficultés rencontrées par les uns et les autres. Comme nous allons le voir, les études portant sur l'évolution des troubles confirment d'ailleurs ce point.

Classifications et sous-types

L'hétérogénéité des profils cognitifs observés parmi les enfants présentant des difficultés en arithmétique a frappé de nombreux chercheurs et cliniciens, les conduisant à proposer diverses classifications en sous-types. On peut grossièrement distinguer trois types de classifications. Celles qui s'inspirent, comme le note Noël (2000), de la neuropsychologie de l'adulte et des études de patients acalculiques, celles qui se fondent sur des bases anatomo-fonctionnelles, et celles enfin qui reposent sur l'étude des fonctions cognitives sous-tendant les activités numériques.

Classifications neuropsychologiques

La première classification des troubles acquis du calcul a été proposée par Hécaen et coll. (1961). Ces auteurs distinguaient :

- les acalculies résultant d'une alexie ou d'une agraphie des nombres pouvant survenir sans trouble associé de lecture et liées à des atteintes de l'hémisphère gauche le plus souvent ;
- les acalculies spatiales consistant en un défaut dans l'organisation spatiale des nombres (mauvais alignement des chiffres dans les colonnes des opérations posées, inversion de chiffres comme 6 pour 9, 12 pour 21) qui résulteraient d'une atteinte des parties postérieures de l'hémisphère droit ;
- les anarithméties, difficultés dans le calcul lui-même plutôt associées à des lésions de l'hémisphère gauche.

On voit que cette classification intéresse surtout l'activité de résolution des opérations posées à laquelle une attention moindre est prêtée aujourd'hui chez l'enfant en comparaison de l'arithmétique mentale ou du dénombrement. Badian (1983) s'est cependant inspirée de cette classification pour distinguer 5 groupes d'enfants présentant des difficultés en arithmétique et pouvant représenter 5 types de dyscalculie :

- dyscalculie résultant d'une aphasie avec alexie ou d'une agraphie des nombres ;
- dyscalculie résultant de difficultés visuo-spatiales avec mauvais alignement des nombres ;

- anarithmétique, c'est-à-dire bonne connaissance des faits numériques mais confusion entre les algorithmes de calcul ;
- dyscalculies liées à des troubles attentionnels se manifestant par des oublis lors de l'exécution des algorithmes de calcul ainsi que des difficultés à mémoriser les tables. On notera avec intérêt que ce sous-type est identifié par Badian comme le plus fréquent ;
- dyscalculies résultant d'une combinaison de ces catégories.

Ce type de classification pourrait être dit composite. On y trouve en effet des sous-types caractérisés par la nature des erreurs les plus fréquentes (l'anarithmétique), d'autres définis par une cause fonctionnelle sous-jacente (un trouble de l'attention, des difficultés spatiales), d'autres enfin décrits comme résultant d'autres troubles (aphasie). On peut ranger dans cette catégorie la classification de Kosc (1974) qui dans son étude princeps pensait pouvoir distinguer entre dyscalculies verbales (difficulté à nommer les objets et relations mathématiques), practognosiques (difficulté dans les manipulations liées aux mathématiques comme le dénombrement, la sériation en fonction de la longueur), lexicales (difficultés de lecture des symboles tels que chiffres, nombres, signes d'opérations), graphiques (affectant l'écriture des chiffres et des nombres), idéagnostiques (difficulté à comprendre les relations mathématiques, par exemple que 9 est à la fois la moitié de 18 et aussi 10-1), et enfin opérationnelles (appelée anarithmétique chez les auteurs cités plus haut).

Bien que ces classifications reposent sur des observations cliniques souvent fines, leur intérêt est sans doute limité. D'une part, comme nous l'avons dit, elles sont composites et hétérogènes parce que non adossées à une théorie explicative du trouble. D'autre part, elles résultent parfois des analyses d'erreurs sur un éventail de tâches extrêmement réduit (la résolution d'opérations posées en colonnes pour Badian). Enfin, elles relèvent souvent d'une analyse pour le moins sommaire des processus cognitifs à la source des erreurs observées. Par exemple, on trouve parmi les erreurs que Badian identifie comme relevant d'un trouble spatial des erreurs qui pourraient tout aussi bien être attribuées à une mauvaise maîtrise des retenues ou de l'écriture positionnelle comme oublier le 0 dans l'écriture de 507, erreur qui relève plus sûrement d'une mauvaise maîtrise des procédures de transcodage que d'un trouble spatial (Barrouillet et coll., 2004a). La portée de ces classifications s'en trouve donc amoindrie dans l'optique d'une éventuelle élaboration d'outils de diagnostic et de remédiation.

Classification anatomo-fonctionnelle de Rourke

La plus connue des classifications est probablement celle de Rourke (Rourke et Finlayson, 1978 ; Rourke et Strang, 1978 ; Rourke, 1993 ; Rourke et Conway, 1997). Cet auteur propose que les déficiences en arithmétique

résultent de deux classes très générales de troubles neuropsychologiques, l'une basée sur des déficits verbaux reflétant un dysfonctionnement de l'hémisphère gauche et l'autre basée sur des déficiences non verbales qui résultent d'atteintes précoces affectant l'hémisphère droit. Cette distinction prend sa source dans une étude princeps distinguant des enfants présentant de faibles performances en arithmétique et en lecture (groupe 1), des enfants ayant de faibles performances en lecture et meilleures en arithmétique (groupe 2) et enfin des enfants ayant des difficultés plus prononcées en arithmétique qu'en lecture (groupe 3), les trois groupes étant appariés sur le QI total. Les auteurs prédisaient que les enfants du groupe 3, surtout faibles en arithmétique, présenteraient un QI verbal supérieur au QI performance alors que les enfants du groupe 2 présenteraient un QI performance supérieur à celui du groupe 3. Ces prédictions se fondent sur l'hypothèse que des difficultés spécifiques en calcul sont dues à des difficultés dans l'organisation et l'intégration visuo-spatiale, habiletés considérées comme assurées principalement par l'hémisphère droit et dont la défaillance devrait entraîner un QI performance faible à la WISC. Corrélativement, l'auteur suppose que l'intégrité de l'hémisphère gauche se manifeste par un QI verbal normal. De fait, les auteurs observaient que les enfants du groupe 2 présentaient un QI verbal nettement inférieur au QI performance (92 *versus* 107) alors que l'inverse était observé pour le groupe 3 (102 *versus* 88). Rourke et Strang (1978) ont examiné les performances de ces trois groupes dans des tâches motrices, psychomotrices et perceptives et confirmé que les enfants du groupe 3 présentaient une déficience dans ces activités, confirmant par là l'hypothèse d'une déficience relative des systèmes de l'hémisphère droit. Les déficiences des enfants du groupe 2 seraient en revanche confinées au domaine verbal, et plus particulièrement aux aspects auditivo-perceptifs. Strang et Rourke (1983) ajouteront à ce tableau que les enfants du groupe 3 présentent de moins bonnes performances que ceux du groupe 2 dans des tâches d'extraction de concepts impliquant des raisonnements non verbaux abstraits et la capacité à bénéficier de *feed-back* positifs et négatifs. Dans une synthèse de ces travaux, Rourke (1993) évoquant le cadre théorique piagétien suggère alors que, contrairement aux enfants du groupe 2, ceux du groupe 3 « n'auraient pas bénéficié autant que les autres de la période sensorimotrice de développement et que l'on peut s'attendre à ce que leurs opérations cognitives, et principalement celles qui ne sont pas facilement régulées par des apprentissages verbaux par cœur, soient déficientes ». Les désordres développementaux de l'hémisphère droit conduiraient les enfants du groupe 3 à développer un syndrome de déficience non verbale affectant en outre l'adaptation sociale et la stabilité émotionnelle.

Sur le plan des performances arithmétiques, il existerait selon Rourke (1993) d'importantes différences qualitatives dans les déficits en arithmétique manifestés par les enfants des groupes 2 et 3. Ces derniers commettraient des erreurs liées à l'organisation spatiale des nombres dans les opérations, des erreurs d'inattention dues à leur négligence de certains

détails visuels, ils oublieraient des étapes dans les procédures de calcul, auraient des difficultés à passer d'une activité à l'autre, présenteraient des troubles graphomoteurs, des insuffisances de raisonnement et de jugement. Ils présenteraient aussi des difficultés à mémoriser les faits numériques, bien que ce type d'erreur ne soit pas prédominant dans le profil. Hélas, l'auteur ne fournit pas de description aussi détaillée des erreurs commises par les enfants du groupe 2.

La cohérence et la précision de ces descriptions ont de quoi impressionner de même que le contraste saisissant que brosse Rourke entre deux types de dyscalculie que tout semble opposer. Néanmoins, malgré son caractère intuitivement attractif (les troubles de la lecture étant de toute évidence liés à la sphère verbale, les troubles du calcul seraient, eux, associés à un déficit des aspects non-verbaux), un examen attentif des travaux disponibles, y compris ceux de Rourke lui-même, conduit à tempérer ce que l'auteur présente souvent comme des faits acquis. Tout d'abord, il convient de souligner que les groupes 2 et 3 présentés par Rourke et Finlayson (1978) ne correspondent pas totalement à la description que les auteurs en font et qui sera ensuite fréquemment reprise (Badian, 1983). En effet, il ne s'agit pas de deux groupes dont l'un aurait des troubles spécifiques en lecture et l'autre des troubles spécifiques en arithmétique. En réalité, ces groupes ne se différencient pas sur leurs performances en arithmétique, mais seulement en lecture. Il s'agit de dyscalculiques dans les deux cas, les uns présentant en outre des difficultés en lecture, les autres non. Ceci explique pourquoi les moyennes du groupe 2 ne se distinguent en rien de celles du groupe 1 (enfants déficitaires dans les deux domaines) dans l'étude princeps de Rourke et Finlayson (1978) et pourquoi les auteurs sont si peu intéressés par ce groupe 1 qui ne fait l'objet de pratiquement aucune analyse. Ce point, sur lequel les auteurs demeurent discrets, sera plus ouvertement reconnu dans les travaux ultérieurs. Il est cependant important et jette un éclairage tout autre sur les différences que rapporte Rourke entre les deux groupes. Étant établi que le groupe 2 présente en fait un déficit en lecture et en arithmétique alors que les déficits du groupe 3 se cantonnent à l'arithmétique, il devient paradoxal de présenter les enfants du groupe 2 comme des individus dont les déficits se limiteraient à la sphère verbale comme le fait Rourke (1993). Par ailleurs, certains résultats rapportés par leurs auteurs comme conformes aux conceptions de Rourke s'en éloignent de manière importante. C'est par exemple le cas de Share et coll. (1988). Ces auteurs testent les hypothèses de Rourke concernant les patterns de QI des enfants selon que leur déficit est spécifique à l'arithmétique (A) ou s'étend à la lecture (A et L). Le pattern d'un QI verbal supérieur au QI performance chez les enfants de type A ne s'observe que chez les garçons mais s'inverse chez les filles. Sur l'ensemble du groupe, la différence disparaît. Les hypothèses initiales de Rourke prévoyaient aussi que le QI performance des enfants du groupe 2 (ici A et L) devait être supérieur à celui du groupe 3 (ici A). Cette différence, négligeable chez les garçons, s'inverse très nettement chez les filles (les filles A ont un QI verbal

inférieur à leur QI performance, lequel est très nettement supérieur à celui des filles A et L), si bien que sur l'ensemble des sujets c'est l'effet inverse de celui prédit par Rourke qui apparaît. En fait, les enfants A et L ont certes un QI verbal faible (le contraire eut étonné) mais un QI performance lui aussi largement inférieur à des enfants témoins. En outre, les enfants A ont un QI verbal inférieur à celui du groupe témoin. Les auteurs sont conduits à conclure que des déficits limités à la sphère langagière ne sont pas suffisants pour expliquer des difficultés en arithmétique s'accompagnant aussi de difficultés en lecture et que si les garçons présentant une dyscalculie spécifique ont des habiletés non verbales faibles (ce qui n'est pas le cas chez les filles), il ne s'en suit pas que leurs déficits sont exclusivement non-verbaux. Dowker (1998) étudiant les relations entre habiletés numériques chez des enfants tout-venant de 6 à 9 ans et scores de QI verbal et performance n'observe pas que le QI performance est plus lié aux performances arithmétiques que le QI verbal. C'est plutôt le contraire qui serait observé.

D'autres études conduisent à fortement tempérer les conclusions de Rourke. Lewis et coll. (1994) n'observent pas que les habiletés non verbales des enfants présentant des déficits spécifiques en arithmétique soient inférieures à celles des enfants présentant en outre des difficultés en lecture, et observent même le contraire. Comme le relève Shalev (2003) et comme nous l'avons vu plus haut, la plupart des études ayant comparé les difficultés rencontrées en arithmétique par divers types de dyscalculiques montrent que ceux qui ont en outre des difficultés en lecture présentent, contrairement aux descriptions de Rourke, les problèmes les plus importants et les plus étendus (Fletcher, 2005). Les différences qualitatives semblent rares entre les groupes et de plus variables d'une étude à l'autre. De manière assez ironique, le déficit le plus régulièrement rapporté chez les enfants ayant des difficultés spécifiques en arithmétique concerne celui auquel Rourke accorde le moins d'importance : la récupération des faits numériques en mémoire. En outre, comme nous le verrons dans l'étude de l'évolution des troubles, les formes de dyscalculie les plus stables et les plus persistantes, suggérant les troubles les plus profonds et envahissants, sont celles qui s'accompagnent de difficultés en lecture. Enfin, les travaux abordant la nature des erreurs en arithmétique commises par les enfants selon que l'intégrité des hémisphères droit ou gauche est atteinte ne confirment pas les descriptions de Rourke. Certes, certaines études rapportent que des atteintes de l'hémisphère droit entraînent plus fréquemment que celles de l'hémisphère gauche des troubles en arithmétique (Aram et Ekelman, 1988). Toutefois, toutes les études ne convergent pas, loin s'en faut. Ashcraft et coll. (1992) comparent les performances et erreurs en arithmétique d'enfants et adolescents présentant une lésion cérébrale acquise gauche ou droite, pour la plupart à la suite d'un accident vasculaire cérébral. Il apparaît que les enfants ayant souffert d'une lésion dans l'hémisphère gauche présentent les troubles les plus importants dans une large gamme d'activités. Les déficits observés chez les enfants présentant une lésion à droite sont moins prononcés et de même nature, y com-

pris lorsqu'une analyse qualitative des erreurs observées est conduite. Ashcraft et coll. (1992), reprenant les conclusions de Spiers (1987) et anticipant celles de Butterworth (1999), proposent que les traitements numériques et mathématiques dépendent principalement de l'hémisphère gauche. On peut à ce propos rappeler que le syndrome de Gertsman, que Rourke (1993) rapproche du syndrome de difficulté d'apprentissage non verbal intéresse l'hémisphère gauche.

Pour conclure, bien qu'elle soit demeurée influente, on peut douter de la pertinence de la classification proposée par Rourke. Il existe sans doute des enfants présentant des troubles spécifiques de l'arithmétique associés à des difficultés d'organisation visuo-spatiale, mais il est en tout état de cause impossible d'affirmer que les enfants présentant des difficultés spécifiques en arithmétique présenteraient systématiquement de telles difficultés visuo-spatiales ni que ces difficultés spécifiques proviendraient d'un dysfonctionnement relatif de l'hémisphère droit. Il est en revanche possible d'affirmer, devant la convergence des résultats, que les troubles isolés de l'arithmétique sont, contrairement à ce que décrit Rourke, moins étendus, importants, et persistants que ceux s'accompagnant en outre d'un trouble de la lecture.

Classifications cognitives

Alors que les classifications décrites jusqu'ici s'appuient sur des analyses cliniques et une investigation des processus intellectuels reposant sur les tests d'intelligence (principalement la WISC), les classifications regroupées dans cette sous-partie sont fondées sur des distinctions introduites par la psychologie cognitive concernant les divers processus qui sous-tendent les activités numériques. Trois classifications ont été proposées dans cette optique par Temple (1992), Geary (1993) et Von Aster (2000).

Temple (1992) propose une classification basée sur l'architecture cognitive que proposent McCloskey et coll. (1985). Ces auteurs, sur la base d'études neuropsychologiques chez l'adulte rapportant des doubles dissociations, proposent que trois modules fonctionnellement indépendants assurent les traitements numériques et le calcul. Le premier module est dit de compréhension des nombres. Il a pour rôle de transformer les entrées verbales ou en chiffres arabes en une représentation sémantique de la quantité à laquelle ses entrées réfèrent. Le second module, de production, traduit les représentations sémantiques en sorties verbales ou en chiffres arabes. Un troisième module est dévolu aux mécanismes de calcul. Ce module comporte à la fois les faits arithmétiques connus et pouvant être retrouvés ainsi que les procédures de calcul requises lorsque la réponse ne peut être directement atteinte par récupération. Doivent être ajoutés à ces procédures les algorithmes associés aux opérateurs arithmétiques. Sur cette base, Temple (1992) distingue trois types de dyscalculie :

- une dyscalculie du traitement numérique qui se caractérise par des difficultés dans le traitement des symboles numériques ou des mots comme des difficultés à lire ou écrire les nombres. Temple (1989) décrit par exemple le cas d'un enfant de 11 ans qui bien qu'ayant un niveau normal de lecture des mots présente d'importantes difficultés pour lire les nombres ou les écrire sous dictée. Noël (2000) fait cependant remarquer, à juste titre, que ce cas est loin d'être « pur », l'enfant ne maîtrisant en fait aucun concept ou opération et ne réussissant à résoudre que des additions dont le total est inférieur à 10 ;
- une dyscalculie des faits numériques qui se caractérise par une incapacité à acquérir les tables d'addition et de multiplication. Temple (1991) décrit un cas d'adolescente qui malgré une intelligence normale et une bonne maîtrise des procédures de calculs commet un grand nombre d'erreurs sur les multiplications simples, produisant le plus fréquemment des résultats faux mais appartenant à la table de l'un ou des deux opérands (voir dans la section précédente l'étude de Barrouillet et coll., 1997, pour une description de ce phénomène) ;
- une dyscalculie procédurale qui se caractérise par une difficulté à planifier et exécuter les diverses étapes des algorithmes de calcul, principalement lorsque les calculs sont complexes et écrits. Là encore, Temple (1991) décrit un cas d'adolescent illustrant ce type chez qui la maîtrise des faits arithmétiques contraste avec les difficultés de résolution des soustractions, multiplications et divisions.

Selon Temple (1997), les dyscalculies développementales qui résultent du dysfonctionnement des modules décrits par McCloskey et coll. (1985) sont comparables aux dissociations fonctionnelles observées chez les patients adultes souffrant d'acalculie suite à des atteintes cérébrales. On notera cependant qu'il s'agit là d'études de cas sur lesquelles il peut être imprudent de fonder des classifications générales. En outre, il arrive parfois que les auteurs forcent un peu le trait pour rendre claires des dissociations qui ne le sont pas totalement. Cependant, ces dissociations n'en restent pas moins frappantes et témoignent a minima de la complexité et de la variété des processus cognitifs sous-tendant les activités arithmétiques et mathématiques.

Une classification proche de celle de Temple a été proposée par Geary (1993). Cet auteur reprend la catégorie désignée par Temple comme dyscalculie procédurale en la précisant : ces enfants utilisent, comme nous l'avons vu, des procédures immatures de comptage et font preuve d'une faible compréhension des concepts qui sous-tendent cette activité. Ce type de dyscalculie est considéré par Geary comme relevant principalement d'un retard de développement résultant probablement d'un dysfonctionnement de l'hémisphère gauche. La dyscalculie des faits numériques chez Temple est ici décrite comme résultant d'un trouble de la mémoire sémantique avec des difficultés à retrouver les faits numériques en mémoire, des temps de récupération particulièrement lents et variables ainsi qu'une forte propension à commettre

des erreurs provoquées par des interférences dans la récupération des réponses. Bien que probablement lié à un dysfonctionnement dans l'hémisphère gauche, ce sous-type se distingue du précédent par le fait qu'il s'agirait, pour Geary, non pas d'un simple retard de développement mais d'une réelle différence, génétiquement héritable, qui reste inchangée tout au long du développement. Enfin, Geary distingue un type visuo-spatial. Celui-ci se traduirait par de mauvais alignements des chiffres dans les opérations posées ou encore une mauvaise interprétation de l'information positionnelle dans l'écriture en base 10. Geary et Hoard (2005) précisent que ce type pourrait aussi s'accompagner de difficultés à représenter de manière spatiale la taille des nombres dans la ligne numérique orientée postulée par Dehaene et Cohen (1997), laquelle constitue la base de ce que ces auteurs appellent le « sens » du nombre. Toutefois, Geary précise que cette hypothèse n'a pas encore été testée.

Comme on le voit, ces deux classifications sont basées sur les apports de la psychologie cognitive à l'étude des activités numériques et de leur développement. Elles reprennent l'opposition générale qui est classiquement établie, dans les processus conduisant à la réponse, entre stratégies procédurales et récupération en mémoire (Logan, 1988 ; Siegler, 1996). Des déficiences dans chacun de ces deux versants des processus cognitifs conduiraient à des dyscalculies procédurales d'une part, « mémorielles » d'autre part. On notera que bien que distincts, les types que Temple et Geary décrivent respectivement comme dyscalculie des traitements numériques et déficit visuo-spatial se recoupent sur certains points, comme les problèmes liés à la valeur positionnelle des chiffres dans l'écriture de la forme arabe des nombres, problèmes tantôt imputés à des troubles de l'organisation spatiale, tantôt à un module spécialisé dans le transcodage.

Von Aster (2000) a pour sa part proposé une classification s'appuyant sur le modèle dit du « triple code » de Dehaene (Dehaene 1992 et 1997 ; Dehaene et Cohen, 1995 et 1997). Selon ce modèle, l'information numérique peut être manipulée dans trois formats de représentation : une représentation analogique codant la magnitude du nombre, un code verbal, et un code visuel pour l'écriture en chiffres arabes. Le code analogique supporterait une représentation sémantique des nombres (de la quantité à laquelle ils réfèrent) sur une ligne numérique mentale orientée. Il serait impliqué dans les activités de comparaison des nombres ainsi que dans l'estimation des quantités et les calculs approximatifs. Le code verbal serait impliqué dans les activités de comptage mais aussi dans l'apprentissage et le maintien des faits numériques (tables d'addition et de multiplication) qui seraient stockés sous une forme verbale. Le code arabe serait impliqué dans les calculs complexes mais aussi dans les jugements de parité. Contrairement au modèle précédemment évoqué de McCloskey et coll. (1985), il existerait des connexions directes entre ces trois codes permettant par exemple de passer directement d'une représentation verbale à une représentation arabe sans qu'une repré-

sentation sémantique du nombre soit nécessairement évoquée. Ceci serait rendu possible par le fait que ces trois codes seraient implantés dans trois systèmes cérébraux distincts mais interconnectés²⁷.

Ainsi, Von Aster décrit trois types de dyscalculie. Il existerait une dyscalculie verbale dans laquelle les enfants éprouveraient des difficultés dans la mise en route des routines de comptage pour effectuer les additions ainsi que dans le stockage et la récupération des faits numériques. Ce type s'accompagnerait fréquemment de difficultés en lecture (50 % selon l'auteur) et de déficits de l'attention avec hyperactivité. Le second type est dit sous-type arabe. Les enfants éprouveraient d'importantes difficultés pour lire et écrire les nombres en chiffres arabes, ce qui se rapproche de la dyscalculie du traitement numérique décrite par Temple (1989). Enfin, Von Aster suggère l'existence d'un type général (*pervasive*) regroupant les enfants ayant des difficultés dans pratiquement tous les domaines de l'activité numérique. Ceci serait dû, selon l'auteur, à un mauvais développement des structures cérébrales qui sous-tendent le code analogique dans le modèle du triple code, privant ces enfants du « sens » des nombres et entraînant des troubles généraux. Toutefois, l'auteur ajoute aussi que pratiquement tous les enfants de ce groupe présentent aussi des difficultés en lecture, suggérant que les troubles dépassent de très loin une simple atteinte du code analogique, lequel est dans le modèle de Dehaene non verbal.

En résumé, il est clair ici encore qu'il n'existe pas de consensus sur l'existence de divers sous-types de dyscalculie. Comme on a pu le voir, chaque auteur distingue des sous-types à partir des modèles théoriques qu'il privilégie. Des travaux plus approfondis seraient sans doute nécessaires pour établir l'existence d'éventuels sous-types.

Facteurs causaux

Comme les diverses classifications exposées ci-dessus le laissent deviner, il n'existe pas de consensus quant aux causes de la dyscalculie. Schématiquement, on peut opposer, comme le fait Butterworth (2005), les auteurs qui proposent que la dyscalculie est une manifestation secondaire d'un déficit cognitif plus général ou plus élémentaire à ceux qui pensent qu'elle est un trouble primaire lié au dysfonctionnement d'un système neuro-anatomique spécifique aux traitements numériques. Dans le premier cas, deux déficits généraux ont été supposés à la source de la dyscalculie : un déficit mémoriel

27. Le code analogique serait implanté de manière bilatérale dans les aires pariétales gauche et droite aux alentours de la jonction pariéto-occipito-temporale de chaque hémisphère. Le code arabe serait aussi implanté dans les deux hémisphères dans les régions occipito-temporales. Enfin, le code verbal serait implanté dans les aires du langage de l'hémisphère gauche.

lié principalement à de faibles ressources en mémoire de travail ou bien un trouble des habiletés visuo-spatiales.

Dyscalculie et mémoire de travail

L'arithmétique étant de toute évidence une activité complexe et de haut niveau sur le plan cognitif, il est naturel que les psychologues aient cherché la cause des troubles dans une déficience des systèmes sollicités par les activités complexes et contrôlées, le plus important d'entre eux étant la mémoire de travail. Geary (1993) a probablement présenté l'exposé le plus détaillé de l'hypothèse sous-tendant cette proposition. Dans sa revue sur les troubles des apprentissages arithmétiques, Geary (1993) souligne que les deux déficits fondamentaux qui caractérisent les enfants qui en sont atteints sont d'une part un retard développemental dans l'utilisation des procédures de calcul qui demeurent immatures, et d'autre part une difficulté notoire à stocker en mémoire, maintenir et retrouver les faits arithmétiques. Ces deux aspects seraient en fait étroitement liés. En effet, il est communément admis, comme nous l'avons vu précédemment, que la mémorisation des faits arithmétiques les plus élémentaires (les faits additifs) résulte de l'association en mémoire des problèmes et de leur réponse obtenue à l'origine à l'aide de procédures algorithmiques de comptage (Siegler, 1996). De faibles capacités en mémoire de travail entraînent une vitesse de traitement réduite rendant les procédures de comptage particulièrement lentes. Cette lenteur favoriserait les erreurs mais aussi l'oubli des valeurs devant être temporairement maintenues en mémoire à court terme jusqu'à ce que la réponse qui doit leur être associée soit obtenue. Thévenot et coll. (2001) ont démontré l'existence de ce phénomène d'oubli des opérandes au cours du calcul algorithmique de la réponse, même chez les adultes. Les enfants disposant de faibles capacités en mémoire de travail auraient ainsi moins de chances que les autres de mémoriser les faits arithmétiques. Le fait que les capacités en mémoire de travail des enfants comme des adolescents sont liées à leurs performances scolaires en arithmétique et mathématiques ne fait aucun doute (Gathercole et Pickering, 2000 ; Bull et Scérif, 2001 ; Gathercole et coll., 2004 ; Lépine et coll., 2005). Plus spécifiquement, Barrouillet et Lépine (2005) ont montré que chez les enfants de 9 et 10 ans la récupération des faits numériques en mémoire est d'autant plus rare et lente que leurs capacités en mémoire de travail sont faibles. Les très faibles performances des dyscalculiques devraient donc s'accompagner de faibles capacités en mémoire de travail.

De fait, de très nombreuses études ont montré que les enfants dyscalculiques ont des capacités en mémoire de travail, voire en mémoire à court terme (évaluées par un simple empan de chiffres) inférieures à celles d'enfants du même âge obtenant des performances normales (Siegel et Ryan, 1989 ; Geary et coll., 1991 ; Hitch et Mc Auley, 1991 ; Swanson, 1993 ; Koontz et Berch, 1996 ; Bull et Johnston, 1997 ; Mc Lean et Hitch, 1999). Cette différence s'observe même lorsque l'effet du QI est contrôlé (Geary et coll., 1999 ; Geary et coll., 2000 ; Geary et coll., 2004). À notre connaissance, seules deux études rapportent une

absence de différence entre dyscalculiques et témoins sur des épreuves mémorielles, celle de Temple et Sherwood (2002) dans laquelle les sujets dyscalculiques sont en outre atteints du syndrome de Turner et celle de Landerl et coll. (2004). On notera cependant que dans cette dernière étude, et comme on l'a déjà souligné précédemment, les sujets sont classés dyscalculiques sur la base de leur lenteur à résoudre des opérations, ce qui est un critère de classification plutôt inhabituel. En revanche, Bull et coll. (1999) rapportent que les différences d'empan de chiffres, de mots et de comptage entre enfants présentant ou non des déficiences en arithmétique disparaissent lorsque les différences individuelles en lecture sont contrôlées. Toutefois, même dans ce cas, les empan en mémoire continuent à être des prédicteurs des performances en arithmétique. Les auteurs font à ce propos remarquer que beaucoup d'études ne prennent pas en compte ce facteur dans l'évaluation des différences en mémoire de travail ou mémoire à court terme (Siegel et Ryan, 1989 ; Geary et coll., 1991 ; Hitch et McAuley, 1991). Ils concluent qu'il est difficile d'affirmer avec certitude que les déficits en arithmétique sont spécifiquement dus à des limitations de la mémoire à court terme : bien que les limitations en mémoire soient manifestement impliquées dans les difficultés en arithmétique, elles agissent en conjonction avec d'autres facteurs dont le principal semble être la vitesse de traitement de l'information. Les auteurs ont peut-être raison mais le problème se complique du fait que mémoire de travail et mémoire à court terme ne peuvent totalement être confondues et que les théories récentes de la mémoire de travail font de la vitesse de traitement un des facteurs explicatifs (mais non le seul) des empan en mémoire de travail (Barrouillet et coll., 2004b).

En résumé, la grande majorité des études disponibles confirment que les enfants dyscalculiques disposent de capacités réduites en mémoire de travail. Ce déficit pourrait être à la source de leurs fréquentes erreurs dans la mise en œuvre des procédures de comptage et de leurs difficultés à mémoriser les faits numériques. Ces faibles capacités pourraient aussi rendre compte du fait que les enfants en difficulté d'apprentissage semblent, comme nous l'avons vu plus haut, moins aptes que les autres à inhiber les réponses incorrectes lors de la recherche en mémoire (Barrouillet et coll., 1997 ; Geray et coll., 2004). Ajoutons que l'analyse des résultats est rendue malaisée par le fait que peu d'auteurs, dans le domaine des difficultés d'apprentissage, établissent des distinctions claires entre empan simples de mémoire à court terme et empan complexes de mémoire de travail²⁸. De même que les seconds sont de

28. Les empan simples de mémoire à court terme (MCT) consistent en une tâche de rappel immédiat d'une série de chiffres, lettres ou mots présentés oralement ou d'une série d'items présentés visuellement. Les empan complexes de mémoire de travail (MDT) impliquent quant à eux une activité secondaire devant être effectuée durant le maintien des items avant rappel. Par exemple, dans l'empan de comptage, l'enfant dénombre une série de planches de points et doit rappeler à la fin de la série et dans l'ordre de présentation le cardinal de chaque planche dénombrée. Les empan simples de MCT sont considérés habituellement comme des mesures relativement grossières des capacités en mémoire de travail (Conway et Engle, 1994).

meilleurs prédicteurs des performances scolaires que les premiers (Daneman et Carpenter, 1980), il n'est pas exclu qu'une partie des résultats contradictoires relevés soit due à la confusion entre les deux types d'empan.

Dyscalculie et habiletés visuo-spatiales

On a vu que de nombreux auteurs proposent que les troubles de l'arithmétique et les dyscalculies, ou certains sous-types de dyscalculie, sont dus à un déficit plus général des habiletés visuo-spatiales. Les hypothèses visant à rendre compte de l'impact des habiletés spatiales sur l'arithmétique ont évolué avec le temps. Badian (1983) suppose que des habiletés spatiales déficientes pourraient avoir un impact sur la résolution des opérations posées (mauvais alignement des chiffres, saut de colonne) ou sur le transcodage avec des difficultés à maîtriser l'écriture positionnelle ; cette hypothèse est à nouveau reprise par Geary et Hoard (2005). Dans ce cas, l'impact serait expliqué par le fait que certaines activités numériques comportent une composante spatiale. Selon Rourke, les déficits visuo-spatiaux accompagnent plus qu'ils ne provoquent les difficultés en arithmétique, les deux types de déficits découlant d'un dysfonctionnement de l'hémisphère droit. Dans les travaux plus récents, il est suggéré que des troubles de l'espace perturberaient la construction et l'utilisation de la représentation spatiale analogique et orientée, la ligne numérique, qui selon Dehaene coderait la magnitude du nombre et en fournirait le sens. Un tel trouble aurait ainsi une répercussion sur l'ensemble des activités numériques (Von Aster, 2000). Une mauvaise représentation spatiale des nombres pourrait même expliquer selon Jordan et coll. (2003a et b) les difficultés d'apprentissage des faits numériques. Les difficultés de manipulation de la ligne numérique perturberaient les procédures de comptage à la source des associations en mémoire entre problèmes et réponses.

Bien que l'association entre troubles spatiaux et troubles du calcul ait une longue histoire dans les modèles théoriques, les empiries établissant clairement un déficit des fonctions spatiales chez les dyscalculiques sont étonnamment éparses. Bien entendu, il existe celles rapportées par Rourke (Rourke et Finlayson, 1978 ; Rourke et Strang, 1978) qui indiquent que les enfants dyscalculiques ont de plus faibles performances que les enfants tout-venant dans les sub-tests « Complètement d'images », « Arrangements d'images », « Cubes, et Assemblage d'objets » de la WISC-R (Weschler, 1974). Jordan et coll. (2003a et b) ont rapporté des faits similaires, les enfants ayant une faible maîtrise des faits arithmétiques présentant de plus faibles performances dans les épreuves de QI non verbal. Cependant, nous avons aussi vu que le caractère spécifique de ces difficultés n'a pas toujours été répliqué, suggérant qu'elles pouvaient aussi être simplement liées à un faible niveau intellectuel général. Par exemple, Geary et coll. (2000) n'observent plus de différences selon les habiletés en arithmétique sur une épreuve de labyrinthes lorsque l'effet du QI est contrôlé. De même, les faibles performances des

dyscalculiques dans les *Making Trails tasks* ont parfois été rapportées à des problèmes d'intégration visuo-motrice (White et coll., 1992). Ce sont des tâches dans lesquelles l'enfant doit alterner deux séries, par exemple des chiffres et des lettres, en reliant par un trait des cercles contenant des nombres de 1 à 11 ou des lettres de A à K selon l'ordre 1-A-2-B-3-C...11-K. Cependant, Mc Lean et Hitch (1999) observent que les dyscalculiques ont aussi des difficultés dans les versions verbales de ces tâches (produire verbalement la série alternée), ce qui suggère que les problèmes rencontrés dans les *Making Trails tasks* sont plutôt dus à des difficultés à alterner rapidement des tâches plutôt qu'à des problèmes visuo-moteurs.

Ce puzzle pourrait trouver sa solution dans l'observation par Share et coll. (1988) que les déficits visuo-spatiaux semblent caractériser les garçons mais non les filles dyscalculiques. La diversité des résultats rapportés dans la littérature pourrait alors s'expliquer par le fait que l'analyse des résultats ne se fait pratiquement jamais en prenant en compte le sexe des sujets. Les différences pourraient dès lors dépendre de la proportion de garçons et de filles dans les populations expérimentales retenues.

Dyscalculie et atteinte d'un « module numérique »

Les facteurs évoqués jusqu'ici relient la dyscalculie à un trouble cognitif plus général dont la dyscalculie serait une manifestation. D'autres auteurs au contraire proposent que la dyscalculie résulterait d'un déficit sélectif et spécifique dans une capacité élémentaire à comprendre les nombres. Selon cette conception, principalement défendue par Butterworth (2005), les êtres humains naissent avec une capacité à reconnaître et manipuler mentalement des numérosités. Cette capacité résulterait de l'existence de circuits neuronaux spécifiques spécialisés dans les traitements numériques dont le mauvais développement ou fonctionnement serait à la source de la dyscalculie.

Cette hypothèse prend sa source dans les travaux de psychologie cognitive de ces trente dernières années qui ont mis en évidence des capacités jusque-là insoupçonnées chez les bébés humains. En utilisant des paradigmes expérimentaux particulièrement astucieux reposant sur le phénomène d'habituation, Starkey et Cooper (1980) ont mis en évidence la capacité chez des bébés de 5 mois à discriminer entre des collections de 2 et de 3 objets. Quelques années plus tard, Antell et Keating (1983) retrouvaient cette même capacité chez des bébés âgés seulement de 1 à 3 jours. De nombreuses études ont répliqué ces résultats quelle que soit la manipulation des conditions de présentation des objets (Starkey et coll., 1990). Cependant, pour des quantités supérieures à 3, les résultats sont beaucoup moins clairs. Par exemple, les bébés de 10-12 mois ne pourraient pas discriminer 4 de 5 (Strauss et Curtiss, 1984). Plus récemment, on a établi que les bébés avaient la capacité de discriminer des collections de plus grande taille à condition qu'elles diffèrent suffisamment entre elles. Par exemple, des bébés de 6 mois peuvent faire la

différence entre des collections de 8 et 16 objets mais ne peuvent discriminer 8 de 12 (Xu et Spelke, 2000). Une preuve supplémentaire des capacités numériques innées provient des recherches portant sur l'appariement de collections selon leur taille. Les bébés sont capables d'associer des collections ayant la même taille et ceci bien que ces collections aient été présentées dans des modalités sensorielles différentes (visuelle et auditive, Starkey et coll., 1990 ; voir cependant Moore et coll., 1987). Certains auteurs ont même affirmé que les bébés seraient capables d'effectuer des opérations élémentaires. Dans une série d'expériences, Wynn (1992) a montré que des bébés de 5 mois étaient capables d'effectuer des « calculs » (addition et soustraction) sur de petites quantités (1+1 ou 2-1). Ces résultats ont été répliqués de nombreuses fois (Uller et coll., 1999).

Ces compétences seraient liées à deux systèmes élémentaires et innés de traitement des nombres que nous partageons avec d'autres espèces animales (Feigenson et coll., 2004). Le premier, que nous avons déjà évoqué dans la présentation du modèle du triple code de Dehaene, permettrait la représentation de grandes quantités mais de façon approximative alors que le second permettrait la reconnaissance et discrimination précises de petites quantités mais serait limité à 4 voire 3 items maximum. De nombreuses études utilisant les potentiels évoqués (Dehaene, 1996 ; Kiefer et Dehaene, 1997) ou l'imagerie fonctionnelle (Dehaene et coll., 1999 ; Pinel et coll., 2001) convergent pour suggérer que le premier système est implémenté de manière bilatérale dans le cortex pariétal, et plus précisément dans le sillon intrapariétal. Les associations entre ces aires et celles du langage permettraient la représentation précise des grands nombres et de leur signification. De manière intéressante, les sillons intrapariétaux sont aussi impliqués dans le contrôle des doigts que les enfants utilisent pour compter. En revanche, les tentatives d'identification des corrélats neuronaux du second système ont jusqu'ici échoué.

L'hypothèse générale est que ces systèmes constitueraient les fondements de notre compréhension du nombre et de l'acquisition des habiletés numériques. Ainsi, des déficits précoces de ces systèmes, et principalement du premier, ou une anomalie dans leur développement pourraient être la cause de la dyscalculie chez des enfants se développant par ailleurs de façon tout à fait normale (Feigenson et coll., 2004). Par exemple, pour Butterworth (1999), une atteinte des lobes pariétaux, et plus particulièrement dans l'hémisphère gauche, pourrait affecter à la fois la représentation des doigts qui constitue la source de la représentation précise des nombres au travers des activités de comptage, ainsi que la représentation approximative des quantités permettant les activités d'estimation et de comparaison comme l'a montré Dehaene (1996). La proximité des aires impliquées entraînerait un déficit spécifique du sens des nombres et à terme la dyscalculie. Cette hypothèse donnerait par ailleurs un sens au syndrome de Gertsman qui associe la dyscalculie à une agnosie digitale.

Bien que séduisante, l'hypothèse de l'atteinte d'un « module numérique » n'a reçu jusqu'ici que de rares confirmations empiriques. Il a été observé une perte de matière grise dans le sillon intrapariétal pour deux atteintes associées à la dyscalculie, la grande prématurité (Isaacs et coll., 2001) et le syndrome de Turner (Molko et coll., 2003). Sur le plan comportemental, l'hypothèse du « module numérique » prédit que non seulement l'arithmétique, mais aussi et surtout les activités numériques les plus élémentaires, devraient être affectées. C'est le but de l'étude de Landerl et coll. (2004) déjà évoquée plus haut qui tentent de démontrer que les enfants dyscalculiques ont par ailleurs des déficits dans des activités comme la comparaison de nombres. Bien qu'intéressante, cette étude est cependant comme nous l'avons dit peu concluante. Les enfants dyscalculiques sont certes plus lents que leurs témoins dans une tâche de comparaison mais les groupes avaient au préalable été établis sur la base d'une autre épreuve chronométrée (résolution d'additions et de multiplications). Une autre voie serait d'établir un lien entre l'intégrité des systèmes élémentaires en œuvre chez le bébé et les performances ultérieures en arithmétique. Ansari et Karmiloff-Smith (2002) rapportent une étude où des bébés atteints soit du syndrome de Williams soit de celui de Down sont comparés à des bébés normaux dans une tâche de discrimination de quantités comme celles décrites précédemment (2 *versus* 3 objets). Il apparaît que les bébés atteints du syndrome de Williams ont un comportement comparable à celui des témoins dans leur sensibilité aux différences de quantité. En revanche, les enfants atteints du syndrome de Down semblent privés de ces capacités précoces de discrimination de numérosité. Toutefois, il est connu que les adultes atteints du syndrome de Williams présentent des déficits en arithmétique nettement plus prononcés que les adultes atteints du syndrome de Down. Certes, on peut comme les auteurs conclure de ces faits que le développement est non linéaire, mais on pourrait aussi, et peut-être plus simplement, en inférer que les habiletés précoces mises en évidence chez les nourrissons dans la discrimination de quantités demeurent sans lien avec les acquisitions numériques ultérieures. Finalement, l'étude comportementale apportant le plus de crédit à l'hypothèse du « module numérique » est peut-être celle de Fayol et coll. (1998), bien que celle-ci ne concerne pas directement la dyscalculie. Ces auteurs montrent que les performances d'enfants de 5 et 6 ans à des épreuves neuropsychologiques de gnosie et de discrimination digitale sont de meilleurs prédicteurs des performances arithmétiques en CP que le niveau de développement évalué à l'aide d'épreuves de dessin. Ces données sont confirmées par une étude longitudinale jusqu'au CE2 (Marinthe et coll., 2001). Bien que conformes à l'hypothèse générale de Butterworth, ces résultats ne sont cependant pas totalement concluants, l'évaluation du niveau de développement manquant sans doute de précision et l'étude ne portant pas spécifiquement sur une population en difficulté d'apprentissage.

Dyscalculie et facteurs causaux

Comme on peut le voir, malgré de nombreuses études, les causes de la dyscalculie demeurent obscures et pour l'heure largement indéterminées. S'il semble que les enfants dyscalculiques présentent des déficits de la mémoire de travail et des habiletés spatiales, il est possible que ces troubles n'aient pas le rôle déterminant que beaucoup leur accordent. Peut-être sont-ils fréquemment associés à la dyscalculie sans jouer aucun rôle causal. D'autre part, bien que les aires cérébrales identifiées par Dehaene jouent un rôle certain dans les traitements numériques, il n'en est pas pour autant assuré que les dyscalculies résultent de leur dysfonctionnement. Les activités numériques sont diverses et conceptuellement complexes, et il est peut-être hasardeux de supposer que notre capacité à comprendre et manipuler les nombres dépend du bon fonctionnement d'un ou même plusieurs modules numériques. En effet, certaines des prémisses sur lesquelles l'hypothèse du module numérique a été construite n'ont pas jusqu'ici reçu de confirmation empirique. Ainsi, malgré le caractère spectaculaire des capacités des nourrissons, leur lien avec les activités numériques ultérieures de l'enfant et de l'adulte reste à établir. Il n'est pas exclu par ailleurs que la dyscalculie résulte d'une conjonction des facteurs évoqués plus que de l'un ou l'autre d'entre eux considéré isolément.

Pronostic et évolution de la dyscalculie de développement

Il n'existe pour l'heure pas d'étude de l'impact à long terme de la dyscalculie sur le devenir social ou professionnel des individus atteints de dyscalculie développementale. Toutefois, un certain nombre d'études se sont intéressées à l'évolution des troubles au cours de la scolarité afin d'évaluer la stabilité de l'atteinte au cours du temps ainsi que celle des sous-types parfois distingués. Ces études adoptent bien sûr une démarche longitudinale par suivi de cohorte. Une des plus complètes a été conduite par Shalev et son équipe qui ont suivi les enfants identifiés comme dyscalculiques par Gross-Tsur et coll. (1996). Ceux-ci étaient 140 à l'âge de 11 ans. Rappelons que les critères d'inclusion étaient un QI supérieur à 80 et des performances aux tests d'arithmétique inférieures de deux ans au niveau scolaire actuel de l'enfant. Les mêmes enfants sont testés trois ans plus tard par Shalev et coll. (1998) qui retrouvent 123 des 144 enfants de la cohorte initiale et 6 ans plus tard par Shalev et coll. (2005). Ils sont alors 104. Sont considérés dyscalculiques les enfants situés en dessous du percentile 5 d'une population d'étalonnage. Les auteurs observent que 47 % des enfants diagnostiqués dyscalculiques en CM2 le sont toujours 3 ans plus tard selon les critères retenus, ce taux se maintenant à 40 % 6 ans plus tard. Cependant, après 6 ans, 95 % des enfants continuent à éprouver des difficultés en

mathématiques et se situent dans le quartile inférieur de leur classe d'âge. Les auteurs ont en outre analysé l'impact d'un grand nombre de facteurs sur la persistance de la dyscalculie. Les individus présentant un trouble persistant ont un QI plus faible que les autres et présentent plus fréquemment des troubles attentionnels. Si les 42 enfants qui sont toujours identifiés comme dyscalculiques à 17 ans ne se distinguent pas des autres par de plus fréquentes difficultés en lecture (le taux d'enfants ayant des problèmes en lecture serait inférieur à 10 % dans les deux groupes), ils manifestent cependant plus fréquemment des difficultés sur les tests d'écriture. En revanche, le statut socioéconomique, le niveau d'éducation des parents, le sexe, ou encore les performances au test de la figure de Rey sont des facteurs qui n'ont pas d'impact sur la persistance du trouble. Les auteurs relèvent avec un certain désarroi que les interventions pédagogiques et les diverses tentatives de remédiation n'ont pas d'impact sur la persistance du trouble.

L'étude de Shalev et coll. (1998 et 2005) ne distingue pas entre troubles spécifiques aux mathématiques et troubles plus généraux des apprentissages. On a vu précédemment que cette distinction est pertinente en ce qui concerne l'importance des déficits dans le domaine numérique. L'est-elle aussi en ce qui concerne l'évolution des troubles ? C'est la question que posent Silver et coll. (1999). Les auteurs identifient 80 enfants de 9 à 13 ans présentant une déficience en arithmétique parmi lesquels ils distinguent les enfants ayant des difficultés en arithmétique seulement (sous-type A), en arithmétique et lecture (AL), arithmétique et orthographe (AO) ou bien dans les trois matières (ALO). Pour être classé déficient dans une matière donnée, l'enfant doit obtenir un QI supérieur à 90 (WISC-R), un score standardisé dans la matière inférieur à 90 et s'écartant de plus d'un écart-type (15 points) du QI. Au bout de 19 mois, les mêmes enfants sont à nouveau soumis à des tests scolaires. Les résultats sont conformes aux observations de Shalev, 53 % des enfants étant toujours diagnostiqués dyscalculiques. Toutefois, il existe des différences de stabilité entre les sous-types. Le sous-type le plus stable est constitué des enfants présentant les déficits les plus nombreux : 60 % des enfants classés ALO lors du premier test le sont encore lors du second et 96 % d'entre eux présentent toujours au moins deux matières déficitaires. En revanche, seuls 31 % des enfants catégorisés A lors du premier test le sont toujours lors du second, 42 % d'entre eux ne remplissant plus les critères d'inclusion pour aucune matière. Ce dernier phénomène ne s'observe jamais dans le groupe ALO et seulement chez 17 % des enfants initialement classés AO ou AL. En résumé, l'atteinte est d'autant plus stable qu'elle est généralisée, les troubles en arithmétique étant d'autant plus volatils qu'ils sont spécifiques.

Ces faits se trouvent confirmés par une étude longitudinale conduite par l'équipe de Jordan (Jordan et coll., 2002). Cette étude a la particularité de

recourir à une méthode originale consistant à analyser les courbes de développement afin de déterminer la vitesse de développement (ou d'apprentissage) de divers groupes dans divers domaines d'activité en maintenant constantes un certain nombre de variables telles que le QI, le sexe, ou encore le niveau de revenus des parents. Jordan et coll. (2002) identifient 180 enfants de CE1 ayant des difficultés en mathématiques seulement (MD), en lecture seulement (LD), dans les deux matières (MD-LD) ou bien dans aucune et présentant des performances normales dans les deux domaines (PN). Le critère retenu était un score au dessous du 35^e percentile à l'entrée du CE1 (évaluation à l'aide de la batterie Woodcock-Johnson). Il s'agit d'un critère plus élevé qu'à l'accoutumée mais qui présente l'avantage de permettre la constitution d'échantillons importants. Les enfants sont ensuite évalués à trois reprises, au printemps du CE1, à l'automne et au printemps du CE2. Les résultats font apparaître que les enfants MD présentent une vitesse de développement supérieure à celle des enfants MD-LD en mathématiques, qu'il s'agisse d'opérations ou de résolution de problèmes. Dans le domaine des opérations, les enfants MD rejoignent même pratiquement les enfants des groupes PN et LD à la fin du CE2. Les résultats en ce qui concerne la lecture sont fort différents. En début de CE1, les groupes MD et PN sont bien entendu supérieurs aux groupes LD et MD-LD, mais ces différences demeurent inchangées au bout de deux ans, les enfants LD ne se développant pas plus vite que les enfants MD-LD. En d'autres termes, les enfants qui ont un trouble spécifique en arithmétique au début du CE1 se développent plus vite en arithmétique que ceux qui ont des difficultés en arithmétique et en lecture, et ils rattrapent en deux ans une part substantielle de leur retard sur les enfants normaux. À l'inverse, les enfants ayant un trouble spécifique en lecture ne se distinguent pas dans leur apprentissage de lecture des enfants ayant des difficultés globales. Il ressort de cette étude que les difficultés spécifiques en arithmétique sont relativement instables dans le temps, ce qui n'est pas le cas des difficultés en lecture.

En résumé, les études disponibles s'accordent à considérer que la dyscalculie est un trouble relativement persistant. Cette persistance semble d'autant plus forte que la dyscalculie n'est pas un trouble isolé et que le QI de l'enfant est faible, ce qui est somme toute assez peu étonnant. On notera cependant une différence avec la lecture, dont la persistance des troubles semble indépendante d'une éventuelle dyscalculie associée, au moins dans l'étude de Jordan et coll. (2002).

Interventions

Les études rapportant les effets d'interventions auprès d'enfants dyscalculiques en vue d'améliorer leurs performances en arithmétique sont rares. Il

existe certes de nombreux programmes d'intervention auprès d'enfants à risque ayant pour but d'introduire des activités et jeux numériques dans le cursus préscolaire aux États-Unis et en Grande-Bretagne (tableau 11.II). L'efficacité de ces programmes sur des enfants dyscalculiques n'a, à notre connaissance, pas été testée. En revanche, Van Luit et Schopman (2000) ont conduit une étude sur 124 enfants âgés de 5 à 7 ans dont le score à une épreuve de compréhension et de mise en œuvre du dénombrement (*Utrecht Test for Number Sense*) se situait dans le quartile inférieur. La moitié de ces enfants bénéficiaient de deux séances hebdomadaires par groupe de 3 d'une durée d'une demi-heure durant laquelle ils se familiarisaient avec les diverses représentations possibles et le dénombrement de collections de 1 à 15 objets. L'autre moitié constituait le groupe témoin. À la fin des 6 mois d'intervention, le groupe entraîné avait de bien meilleures performances que le groupe témoin, mais seulement sur les activités ayant donné lieu à apprentissage sans aucun transfert à des tâches similaires mais non identiques.

Tableau 11.II : Programmes d'intervention auprès des enfants à risque

Références Pays	Programmes
Programmes préscolaires	
Griffin et coll., 1994 États-Unis	<i>Righthstart Program</i>
Starkey et Klein, 2000 États-Unis	<i>Berkeley Maths Readiness Project</i>
Arnold et coll., 2002 États-Unis	<i>Head Start Program</i>
Ginsburg et coll., 2003 États-Unis	<i>Big Math for Little Kids Program</i>
Gouvernement britannique Grande-Bretagne	<i>Family Numeracy Program</i>
Programmes individuels	
Wright et coll., 2000, 2002 Australie	<i>Mathematics Recovery Program</i>
Dowker, 2001 Grande-Bretagne	<i>Numeracy Recovery</i>

À l'inverse, l'étude de Trundley (1998) offre des résultats plus encourageants, peut-être parce que les objectifs en étaient aussi plus limités : il s'agissait de faire acquérir des stratégies dites *derived fact* où un résultat est dérivé d'un fait numérique connu ($7+5$ font 12 parce que $5+5=10$ et 2, 12). C'est ici l'impact d'interventions individuelles qui était testé auprès d'enfants en difficulté en arithmétique. Les professeurs impliqués dans le

programme offraient une séance individuelle de 20 minutes par semaine durant laquelle les habiletés de comptage étaient renforcées, les faits arithmétiques déjà connus étaient révisés et l'utilisation de faits numériques était suscitée et entraînée afin de dériver des réponses à des problèmes inconnus. Après 5 mois, le nombre de faits arithmétiques connus avait fortement augmenté, les procédures de comptage s'étaient diversifiées et la stratégie des faits dérivés étendue à de nombreux problèmes. Une intervention auprès de 6 enfants dyscalculiques de 9 et 10 ans conduite par Kaufmann et coll. (2003) portant sur une plus vaste gamme d'activités s'est aussi avérée efficace.

Des programmes individuels s'adressant à des enfants dyscalculiques ont été testés avec succès en Australie, le *Mathematics Recovery Program* (Wright et coll., 2000 et 2002), et en Angleterre le *Numeracy Recovery* (Dowker, 2001). Le premier est intensif (1/2 heure par jour pendant 3 mois), le second l'étant beaucoup moins (1/2 heure par semaine sur 30 semaines). Dans les deux cas, les interventions sont faites par les enseignants. Ces programmes ont la particularité de focaliser leur action sur les aspects des activités numériques les plus déficitaires chez les participants. Ces programmes s'avèrent efficaces, les enfants rattrapant parfois leur retard. Par ailleurs, l'étude de Dowker fait état d'un effet de l'apprentissage lors d'un post-test à un an.

Hasselbring et coll. (1988) ont pour leur part proposé une intervention à des enfants dyscalculiques plus âgés qui, comme on l'a vu, se caractérisent par une incapacité à mémoriser les faits numériques. Les auteurs utilisent un programme informatique qui crée des exercices individualisés présentant un mélange d'opérations dont le résultat est connu de l'enfant et d'opérations dont il ignore la réponse. Le programme force l'enfant à donner sa réponse sur la base d'une récupération en mémoire. L'entraînement était poursuivi jusqu'à ce que l'enfant utilise cette stratégie. Ce procédé est efficace pour la plupart des enfants dyscalculiques mais pas tous. Les enfants utilisant quasi exclusivement des stratégies de comptage sur les doigts ne bénéficient pas de l'apprentissage. Comme le soulignent Gersten et coll. (2005), l'utilisation de l'informatique pour créer des exercices adaptés au niveau de l'enfant constitue sans doute une alternative possible aux exercices sur papier effectués par le groupe classe en entier. De fait, un grand nombre de programmes informatisés ont été développés, les études utilisant ces programmes faisant état de résultats positifs mais sur de petits échantillons. Toutefois, la méta-analyse conduite par Kroesbergen et Van Luit (2003) semble indiquer que les interventions utilisant des programmes informatiques sont moins efficaces que celles conduites par les professeurs.

En résumé, bien que rares, les études sur les interventions laissent penser que des programmes ciblés sur les points les plus déficitaires au cours desquels des exercices adaptés sont proposés par les enseignants en situation individuelle ont une efficacité réelle. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que les

troubles précoces sur lesquels portent beaucoup de ces études (6-7 ans) sont aussi les plus labiles, ce qui peut accroître le nombre de faux positifs dans ces études, et que l'effet de ces interventions à long terme demeure jusqu'ici inconnu alors que la dyscalculie est décrite le plus souvent comme un trouble durable, surtout lorsqu'il s'accompagne d'autres difficultés d'apprentissage. Par ailleurs, à l'exception des programmes informatiques et sans amoindrir le mérite des auteurs, le contenu de ces programmes ne semble pas différer fondamentalement des activités numériques que l'on trouve dans les manuels scolaires ou que pourrait imaginer tout pédagogue un peu inventif, une part importante de leur effet résidant peut-être davantage dans le caractère individuel de la prise en charge que dans l'originalité des activités proposées.

En conclusion, comme de nombreux auteurs le font remarquer, les études sur la dyscalculie n'en sont qu'à leurs débuts et notre degré de connaissance dans ce domaine ne peut être comparé à celui que nous avons acquis concernant la dyslexie. Bien que les difficultés rencontrées par de nombreux enfants en arithmétique et plus tard en mathématiques constituent un problème crucial dans une société technologique comme la nôtre, nos connaissances concernant la dyscalculie sont lacunaires et incertaines. Comme nous l'avons vu, il n'existe pas encore de définition ou de critères diagnostiques universellement admis de la dyscalculie. Ses causes demeurent incertaines et font l'objet de débats, certains hésitant même à la considérer comme un trouble primaire et la considérant comme une conséquence d'un trouble plus général des fonctions cognitives. Il n'est pas certain que de réels sous-types qui différeraient qualitativement puissent être distingués. Enfin, les manifestations du trouble ont jusqu'ici été analysées dans les domaines les mieux connus par la psychologie (le dénombrement, les stratégies de résolution des opérations simples, les algorithmes des opérations complexes), lesquels ne constituent qu'une petite partie des activités numériques et arithmétiques auxquelles les enfants sont quotidiennement confrontés dans la classe.

La limitation de nos connaissances concernant la dyscalculie est due à la fois au faible nombre d'études consacrées à la dyscalculie, comparativement à la dyslexie par exemple, mais surtout à l'ampleur et à la difficulté même de l'objet d'étude. Bien que la « lecture » et le « calcul » soient souvent mis sur un pied d'égalité comme les acquisitions fondamentales de l'école primaire, cela ne doit pas faire oublier que ces domaines ne sont pas comparables dans leur complexité sur le plan cognitif. Ce que l'on entend par traitements numériques et arithmétiques recouvre en réalité une grande variété d'activités allant de la quantification rapide de petites collections à la résolution de problèmes à énoncés verbaux impliquant la planification de solutions en plusieurs étapes, en passant par l'utilisation de plusieurs codes (oral, écrit, arabe), de nombreuses formes de dénombrement, la compréhension de la

notation en base 10, celle des nombres décimaux, des fractions, la manipulation d'algorithmes complexes pour résoudre les opérations... En outre, il revient à l'enfant d'intégrer chacune de ces acquisitions dans un système conceptuel qui est un univers à lui seul. Ainsi, il n'est pas étonnant que la dyslexie et les déficits qui la provoquent soient mieux compris que la dyscalculie. En outre, les activités numériques impliquent un tel nombre de fonctions cognitives que l'on peut légitimement douter de la possibilité d'identifier « la » fonction déficitaire qui serait à l'origine des difficultés en arithmétique. En tout état de cause, la dyscalculie est parmi les troubles de l'apprentissage pour lesquels les besoins de recherche sont les plus urgents. Il serait avant toute chose souhaitable que la communauté scientifique parvienne à un accord sur un ensemble de critères unanimement reconnus qui faciliteraient la comparaison entre études. Il est probable que les divergences observées aujourd'hui sont en partie dues au fait que les populations désignées sous des vocables identiques varient parfois fortement d'une étude à l'autre. Ensuite, la plupart des recherches se sont jusqu'ici limitées à un sous-ensemble relativement réduit des activités numériques qui pourraient faire l'objet d'une étude. Les recherches futures devront à l'évidence élargir cet éventail. On ne sait en effet presque rien de la compréhension par les dyscalculiques des nombres décimaux ou des fractions, mais aussi d'éventuelles difficultés dans l'acquisition du code arabe, la compréhension des concepts régissant les opérations comme la commutativité ou l'identité, ou encore leur capacité d'estimation des grandes quantités, sans parler de possibles difficultés dans le domaine du raisonnement. Enfin, les premières étapes des apprentissages devraient faire l'objet d'une attention particulière. Si, comme le pensent certains, la dyscalculie est bien un trouble spécifique dû au dysfonctionnement de structures cérébrales spécialisées, un effort de recherche particulier devrait se porter sur la cognition numérique chez le jeune enfant, à l'âge des toutes premières acquisitions, bien avant l'entrée à l'école primaire. Ce n'est que lorsque les causes de la dyscalculie seront mieux comprises que des programmes d'intervention raisonnés pourront être conçus, programmes dont l'efficacité devra être rigoureusement évaluée.

BIBLIOGRAPHIE

ACKERMAN PT, ANHALT JM, DYKMAN RA. Arithmetic automatization failure in children with attention and reading disorders: associations and sequela. *Journal of Learning Disabilities* 1986, **19** : 222-231

ALARCON M, DEFRIES JC, LIGHT JG, PENNINGTON BF. A twin study of mathematics disability. *Journal of Learning Disabilities* 1997, **30** : 617-623

AMERICAN PSYCHIATRIC ASSOCIATION. Troubles des apprentissages (auparavant troubles des acquisitions scolaires). In : DSM-IV-TR. manuel diagnostique et statis-

- tique des troubles mentaux. American Psychiatric Association, Masson, 2004 : 56-65
- ANSARI D, KARMILOFF-SMITH A. Atypical trajectories of number development: A neuroconstructivist perspective. *Trends in Cognitive Sciences* 2002, **6** : 511-516
- ANTELL S, KEATING DP. Perception of numerical invariance in neonates. *Child Development* 1983, **54** : 695-701
- ARAM DM, EKELMAN BL. Scholastic aptitude and achievement among children with unilateral brain lesions. *Neuropsychologia* 1988, **26** : 903-916
- ARNOLD DH, FISHER PH, DOCTOROFF GL, DOBBS J. Accelerating math development in Head Start classrooms. *Journal of Educational Psychology* 2002, **94** : 762-770
- ASHCRAFT MH. The development of cognitive arithmetic : A chronometric approach. *Developmental Review* 1982, **2** : 213-236
- ASHCRAFT MH, YAMASHITA TS, ARAM DM. Mathematics performance in left and right brain-lesioned children and adolescents. *Brain & Cognition* 1992, **19** : 208-252
- BADIAN NA. Dyscalculia and nonverbal disorders of learning. In : Progress in learning disabilities. MYKLEBUST HR (ed). (Vol 5), Stratton, New York, NY, 1983 : 235-364
- BALLOTIN U, ISOLA V, LARIZZA D, PICCINELLI P, ROSSI G, CURTO FL. Cognitive functions in Turner's syndrome. *Minerva Pediatrica* 1998, **50** : 419-425
- BARNES MA, SMITH-CHANT B, LANDRY SH. Number processing in neurodevelopmental disorders: Spina bifida myelomeningocele. In : Handbook of mathematical cognition. CAMPBELL JID (ed). Psychology Press, New York, NY, 2005 : 299-314
- BARROUILLET P, LÉPINE R. Working memory and children's use of retrieval to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology* 2005, **91** : 183-204
- BARROUILLET P, FAYOL M, LATHULIÈRE E. Selecting between competitors in multiplication tasks: An explanation of the errors produced by adolescents with learning difficulties. *International Journal of Behavioral Development* 1997, **21** : 253-275
- BARROUILLET P, CAMOS V, PERRUCHET P, SERON X. ADAPT: A Developmental, Asemantic, and Procedural model for Transcoding from verbal to Arabic numerals. *Psychological Review* 2004a, **111** : 368-394
- BARROUILLET P, BERNARDIN S, CAMOS V. Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General* 2004b, **133** : 83-100
- BENNETTO L, TAYLOR AK, PENNINGTON BF, PORTER D, KAGERMAN RJ. Profile of cognitive functioning in women with the fragile X mutation. *Neuropsychology* 2001, **15** : 290-299
- BENTON AL. Mathematical disability and the Gerstmann syndrome. In : Mathematical disabilities. A cognitive neuropsychological perspective. DELOCHE G, SERON X (eds). Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1987 : 111-120
- BRIARS D, SIEGLER RS. A feature analysis of preschoolers' counting knowledge. *Developmental Psychology* 1984, **20** : 607-618

BRYANT DP, BRYANT BR, HAMMILL DD. Characteristic behaviors of students with LD who have teacher-identified math weaknesses. *Journal of Learning Disabilities* 2000, **33** : 168-177

BULL R, JOHNSTON RS. Children's arithmetic difficulties: Contribution from processing speed, item identification, and short-term memory. *Journal of Experimental Child Psychology* 1997, **65** : 1-24

BULL R, SCERIF G. Executive functioning as a predictor of children's mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology* 2001, **19** : 273-293

BULL R, JOHNSTON RS, ROY JA. Exploring the role of the visual-spatial sketch pad and central executive in children's arithmetical skills: Views from cognition and developmental neuropsychology. *Developmental Neuropsychology* 1999, **15** : 421-442

BUTTERWORTH B. What counts: How every brain is hardwired for math. The Free Press, New York, NY, 1999

BUTTERWORTH B. Developmental dyscalculia. In : Handbook of mathematical cognition. CAMPBELL JID (ed). Psychology Press, New York, NY, 2005 : 455-468

CARPENTER TP, MOSER JM. The acquisition of addition and subtraction concepts in grades one through three. *Journal of Research in Mathematics Education* 1984, **15** : 179-202

COHN R. Arithmetic and learning disabilities. In : Progress in learning disabilities. MYKLEBUST HR (ed). Grune & Stratton, New York, 1971 : 322-389

CONWAY ARA, ENGLE RW. Working memory and retrieval: A resource-dependent inhibition model. *Journal of Experimental Psychology: General* 1994, **4** : 354-373

DANEMAN M, CARPENTER PA. Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 1980, **19** : 450-466

DEHAENE S. Varieties of numerical abilities. *Cognition* 1992, **4** : 1-42

DEHAENE S. The organization of brain activations in number comparison: Event-related potentials and the additive-factors method. *Journal of Cognitive Neurosciences* 1996, **8** : 47-68

DEHAENE S. The number sense. Oxford University Press, New York, 1997

DEHAENE S, COHEN L. Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition* 1995, **1** : 83-120

DEHAENE S, COHEN L. Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex* 1997, **33** : 219-250

DEHAENE S, SPELKE L, STANESCU R, PINEL P, TSIVKIN S. Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science* 1999, **284** : 970-974

DEHAENE S, PIAZZA M, PINEL P, COHEN L. Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology* 2003, **20** : 487-506

DESOETE A, ROEYERS H, DE CLERCQ A. Children with mathematics learning disabilities in Belgium. *Journal of Learning Disabilities* 2004, **37** : 50-61

- DOWKER A. Individual differences in normal arithmetical development. In : The development of mathematical skills. DONLAN C (ed). Psychology Press, Hove, England, 1998 : 275-302
- DOWKER A. Numeracy recovery: A pilot scheme for early intervention with young children with numeracy difficulties. *Support for Learning* 2001, **16** : 6-10
- FAYOL M. L'enfant et le nombre. Delachaux & Niestlé, Lausanne, 1990
- FAYOL M, BARROUILLET P, MARINTHE C. Predicting arithmetic achievement from neuropsychological performance: A longitudinal study. *Cognition* 1998, **68** : B63-B70
- FEIGENSON L, DEHAENE S, SPELKE E. Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences* 2004, **8** : 307-314
- FLETCHER JM. Predicting math outcomes: Reading predictors and comorbidity. *Journal of Learning Disabilities* 2005, **38** : 308-312
- FUCHS LS, FUCHS D. Mathematical problem-solving profiles of students with mathematics disabilities with and without comorbid reading disabilities. *Journal of Learning Disabilities* 2002, **35** : 563-573
- FUSON KC. Children's counting and concepts of number. New York, Springer-Verlag, 1988
- GATHERCOLE SE, PICKERING SJ. Assessment of working memory in six- and seven-year-old children. *Journal of Educational Psychology* 2000, **92** : 377-390
- GATHERCOLE SE, PICKERING SJ, KNIGHT C, STEGMANN Z. Working memory skills and educational attainment: Evidence from national curriculum assessments at 7 and 14 years of age. *Applied Cognitive Psychology* 2004, **18** : 1-16
- GEARY DC. A componential analysis of an early learning deficit in mathematics. *Journal of Experimental Child Psychology* 1990, **49** : 363-383
- GEARY DC. Mathematical disabilities: Cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin* 1993, **114** : 345-362
- GEARY DC. Children's mathematical development: Research and practical applications. American Psychological Association, Washington, DC, 1994
- GEARY DC. Mathematics and learning disabilities. *Journal of Learning Disabilities* 2004, **37** : 4-15
- GEARY DC, BROWN SC. Cognitive addition: Strategy choice and speed-of-processing differences in gifted, normal, and mathematically disabled children. *Developmental Psychology* 1991, **27** : 398-406
- GEARY DC, HOARD MK. Learning disabilities in arithmetic and mathematics: Theoretical and empirical perspectives. In : Handbook of mathematical cognition. CAMPBELL JID (ed). New York, NY, Psychology Press, 2005 : 253-268
- GEARY DC, WIDAMAN KF, LITTLE TD, CORMIER P. Cognitive addition : Comparison of learning disabled and academically normal elementary school children. *Cognitive Development* 1987, **2** : 249-269

GEARY DC, BROWN SC, SAMARANAYAKE VA. Cognitive addition: A short longitudinal study of strategy choice and speed-of-processing differences in normal and mathematically disabled children. *Developmental Psychology* 1991, **27** : 787-798

GEARY DC, BOW-THOMAS C, YAO Y. Counting knowledge and skill in cognitive addition: A comparison of normal and mathematically disabled children. *Journal of Experimental Child Psychology* 1992, **54** : 372-391

GEARY DC, HOARD MK, HAMSON CO. Numerical and arithmetical cognition: Patterns of functions and deficits in children at risk for mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology* 1999, **74** : 213-239

GEARY DC, HAMSON CO, HOARD MK. Numerical and arithmetical cognition: A longitudinal study of process and concepts deficits in children with learning disability. *Journal of Experimental Child Psychology* 2000, **77** : 236-263

GEARY DC, HOARD MK, BYRD-CRAVEN J, DESOTO MC. Strategy choices in simple and complex additions: Contributions of working memory and counting knowledge for children with mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology* 2004, **88** : 121-151

GELMAN R, GALLISTEL CR. The child's understanding of number. Harvard University Press, Cambridge, MA, 1978

GELMAN R, MECK E. Preschooler's counting: Principles before skills. *Cognition* 1983, **13** : 343-359

GERSTEN R, JORDAN NC, FLOJO JR. Early identification and interventions for students with mathematics difficulties. *Journal of Learning Disabilities* 2005, **38** : 293-304

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

GINSBURG HP, GREENES C, BALTANZ R. Big Math for Little Kids. Dale Seymour Publications, Parsippany, NJ, 2003

GRIFFIN SA, CASE R, SIEGLER R. Righstart: Providing the central conceptual prerequisites for first formal learning of arithmetic to students at risk for school failure. In : Classroom lessons: Integrating cognitive theory and classroom practice. MCGILLY K (ed). MIT Press, Cambridge, MA, 1994 : 25-49

GROEN GJ, RESNICK LB. Can preschool children invent addition algorithm? *Journal of Educational Psychology* 1977, **69** : 645-652

GROSS-TSUR V, MANOR O, SHALEV RS. Developmental dyscalculia, gender, and the brain. *Archives of Disease in Childhood* 1993, **68** : 510-512

GROSS-TSUR V, MANOR O, SHALEV RS. Developmental dyscalculia: Prevalence and demographic features. *Developmental Medicine and Child Neurology* 1996, **38** : 25-33

HANISH LB, JORDAN NC, KAPLAN D, DICK J. Performance across different areas of mathematical cognition in children with learning difficulties. *Journal of Educational Psychology* 2001, **93** : 615-626

HASSELBRING TS, GOIN LI, BRANSFORD JD. Developing math automaticity in learning handicapped children: The role of computerized drill and practice. *Focus on Exceptional Child* 1988, **20** : 1-7

- HÉCAEN H, ANGELERGUES R, HOUILLIER S. Les variétés cliniques des acalculies au cours des lésions rétro-rolandiques: Approche statistique du problème. *Revue de Neurologie* 1961, **105** : 85-103
- HITCH GJ, MCAULEY E. Working memory in children with specific arithmetical learning difficulties. *British Journal of Psychology* 1991, **82** : 375-386
- ISAACS EB, EDMONDS CJ, LUCAS A, GADIAN D. Calculations difficulties in children of very low birthweight: A neural correlate. *Brain* 2001, **124** : 1701-1707
- JORDAN NC, MONTANI TO. Cognitive arithmetic and problem solving: A comparison of children with specific and general mathematics difficulties. *Journal of Learning Disabilities* 1997, **30** : 624-634
- JORDAN NC, HANISH LB. Mathematical thinking in second-grade children with different forms of LD. *Journal of Learning Disabilities* 2000, **33** : 567-578
- JORDAN NC, KAPLAN D, HANISH LB. Achievement growth in children with learning difficulties in mathematics: Findings of a two-year longitudinal study. *Journal of Educational Psychology* 2002, **94** : 586-597
- JORDAN NC, HANISH LB, KAPLAN D. Arithmetic fact mastery in young children: A longitudinal investigation. *Journal of Experimental Child Psychology* 2003a, **85** : 103-119
- JORDAN NC, HANISH LB, KAPLAN D. A longitudinal study of mathematical competencies in children with specific mathematics difficulties versus children with comorbid mathematics and reading difficulties. *Child Development* 2003b, **74** : 834-850
- KAUFMANN L, HANDL P, THONY B. Evaluation of a numeracy intervention program focusing on basic numerical knowledge and conceptual knowledge: A pilot study. *Journal of Learning Disabilities* 2003, **36** : 564-573
- KIEFER M, DEHAENE S. The time course of parietal activation in single-digit multiplication: Evidence from event-related potentials. *Mathematical Cognition* 1997, **3** : 1-30
- KOONST KL, BERCH DB. Identifying simple numerical stimuli: Processing inefficiencies exhibited by arithmetic learning disabled children. *Mathematical Cognition* 1996, **2** : 1-23
- KOSC L. Developmental dyscalculia. *Journal of Learning Disabilities* 1974, **7** : 164-177
- KROESBERGEN EH, VAN LUIT JEH. Mathematics interventions for children with special educational needs: A meta-analysis. *Remedial and Special Education* 2003, **24** : 97-114
- LANDERL K, BEVAN A, BUTTERWORTH B. Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: A study of 8-9-year-old students. *Cognition* 2004, **93** : 99-125
- LÉPINE R, BARROUILLET P, CAMOS V. What makes working memory spans so predictive of high-level cognition? *Psychonomic Bulletin and Review* 2005, **12** : 165-170
- LEWIS C, HITCH GJ, WALKER P. The prevalence of specific arithmetic difficulties and specific reading difficulties in 9- to 10-year-old boys and girls. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 1994, **35** : 283-292

LIGHT JG, DEFRIES JC. Comorbidity of reading and mathematics disabilities: Genetic and environmental etiologies. *Journal of Learning Disabilities* 1995, **28** : 96-106

LOGAN GD. Toward an instance theory of automatization. *Psychological review* 1988, **95** : 492-527

MANOR O, SHALEV RS, JOSEPH A, GROSS-TSUR V. Arithmetic skills in kindergarten children with developmental language disorders. *European Journal of Paediatric Neurology* 2000, **5** : 71-77

MARINTHE C, FAYOL M, BARROUILLET P. Des gnosies digitales à la performance arithmétique. In : Les dyscalculies. VAN HOUT A, MELJAC C (eds). Masson, Paris, 2001

MAZOCCO MMM. Math learning Disability and Math LD subtypes: Evidence from studies of Turner syndrome, fragile X syndrome, and neurofibromatosis type 1. *Journal of Learning Disabilities* 2001, **34** : 520-533

MAZOCCO MMM, MYERS GF. Complexities in identifying and defining mathematics learning disability in the primary school-age years. *Annals of Dyslexia* 2003, **53** : 218-253

MAZOCCO MMM, MCCLOSKEY M. Math performance in girls with Turner or fragile X syndrome. In : Handbook of mathematical cognition. CAMPBELL JID (ed). Psychology Press, New York, NY, 2005 : 269-298

MCCLOSKEY M, CARAMAZZA A, BASILI A. Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition* 1985, **4** : 171-196

MCLEAN JF, HITCH GJ. Working memory impairments in children with specific arithmetic learning difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology* 1999, **74** : 240-260

MOLKO N, CACHIA A, RIVIERE D, MANGIN J, BRUANDET M, et coll. Functional and structural alterations of the intraparietal sulcus in a developmental dyscalculia of genetic origin. *Neuron* 2003, **40** : 847-858

MOORE D, BENENSON J, REZNICK JS, PETERSON M, KAGAN J. Effect of auditory numerical information on infants' looking behavior: Contradictory evidence. *Developmental Psychology* 1987, **23** : 665-670

NICHELLI P, VENNERI A. Right hemisphere developmental learning disability: A case study. *Neurocase* 1995, **1** : 173-177

NOËL MP. La dyscalculie développementale: Un état de la question. In : Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres. PESENTI M, SERON X (eds). Solal, Marseille, 2000 : 59-84

O'HARE AE, BROWN JK, AITKEN K. Dyscalculia in children. *Developmental Medicine and Child Neurology* 1991, **33** : 356-361

OSTAD SA. Developmental differences in addition strategies: A comparison of mathematically disabled and mathematically normal children. *British Journal of Educational Psychology* 1997, **67** : 345-357

- OSTAD SA. Comorbidity between mathematics and spelling difficulties. *Log Phon Vocol* 1998, **23** : 145-154
- OSTAD SA. Developmental progression of subtraction strategies: A comparison of mathematically normal mathematically disabled children. *European Journal of Special Needs Education* 1999, **14** : 21-36
- OSTAD SA. Cognitive subtraction in a developmental perspective: Accuracy, speed-of-processing and strategy-use differences in normal and mathematically disabled children. *Focus on Learning Problems in Mathematics* 2000, **22** : 18-31
- PENNINGTON BF. Genetics of learning disabilities. *Seminars in Neurology* 1991, **11** : 28-34
- PINEL P, DEHAENE S, RIVIERE D, LEBIHAN D. Modulation of parietal activation by semantic distance in number comparison task. *Neuroimage* 2001, **14** : 1013-1026
- ROURKE BP. Arithmetic disabilities, specific and otherwise: A neuropsychological perspective. *Journal of Learning disabilities* 1993, **26** : 214-226
- ROURKE BP, FINLAYSON MA. Neuropsychological significance of variations in patterns of academic performance: Verbal and visuo-spatial abilities. *Journal of Abnormal Child Psychology* 1978, **6** : 121-133
- ROURKE BP, STRANG JD. Neuropsychological significance of variations in patterns of academic performance: Motor, psychomotor, and tactile-perceptual abilities. *Journal of Pediatric Psychology* 1978, **3** : 62-66
- ROURKE BP, CONWAY JA. Disabilities of arithmetic and mathematical reasoning: Perspective from neurology and neuropsychology. *Journal of Learning disabilities* 1997, **30** : 34-46
- ROVET JF. The psychoeducational characteristics of children with Turner syndrome. *Journal of Learning disabilities* 1993, **26** : 333-341
- ROVET JF, SZEKELY C, HOCKENBERRY MN. Specific arithmetic calculation deficits in children with Turner syndrome. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* 1994, **16** : 820-839
- SEIDENBERG M, BECK N, GEISSER M, GIORDANI B, SACKELLARES JC, et coll. Academic achievement of children with epilepsy. *Epilepsia* 1986, **27** : 753-759
- SHALEV RS. Developmental dyscalculia. In : *Handbook of neuropsychology*. SEGALOWITZ SJ, RAPIN I (eds). Vol. 8, Elsevier, Amsterdam, 2003 : 717-729
- SHALEV RS, GROSS-TSUR V. Developmental dyscalculia and medical assessment. *Journal of Learning Disabilities* 1993, **26** : 134-137
- SHALEV RS, GROSS-TSUR V. Developmental Dyscalculia. *Pediatric Neurology* 2001, **24** : 337-342
- SHALEV RS, AUERBACH J, GROSS-TSUR V. Developmental dyscalculia behavioral and attentional aspects: A research note. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 1995, **36** : 1261-1268
- SHALEV RS, MANOR O, GROSS-TSUR V. Neuropsychological aspects of developmental dyscalculia. *Mathematical Cognition* 1997, **33** : 105-120

SHALEV RS, MANOR O, AUERBACH J, GROSS-TSUR V. Persistence of developmental dyscalculia: What counts? *Journal of Pediatrics* 1998, **133** : 358–362

SHALEV RS, MANOR O, KEREM B, AYALI M, BADICHI N, FRIEDLANDER Y, GROSS-TSUR V. Developmental dyscalculia is a familial learning disability. *Journal of Learning Disabilities* 2001, **34** : 59-65

SHALEV RS, MANOR O, GROSS-TSUR V. Developmental dyscalculia: A prospective six-year follow-up. *Developmental Medicine and Child Neurology* 2005, **47** : 121–125

SHARE DL, MOFFITT TE, SILVA PA. Factors associated with arithmetic-and-reading disability and specific arithmetic disability. *Journal of Learning Disabilities* 1988, **21** : 313-320

SIEGEL LS, RYAN EB. The development of working memory in normally achieving and subtypes of learning disabled children. *Child Development* 1989, **60** : 973-980

SIEGLER RS. The perils of averaging data over strategies: An example from children's addition. *Journal of Experimental Psychology: General* 1987, **116** : 250-264

SIEGLER RS. *Emerging minds: The process of change in children's thinking*. Oxford University Press, New York, 1996

SIEGLER RS, SHRAGER J. Strategy choices in addition and subtraction: How do children know what to do? In : *Origins of cognitive skills*. SOPHIAN C (ed). Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1984

SILVER CH, PENNETT HDL, BLACK JL, FAIR GW, BALISE RR. Stability of arithmetic disability subtypes. *Journal of Learning Disabilities* 1999, **32** : 108-119

SPIERS PA. Acalculia revisited: Current issues. In : *Mathematical disabilities: A cognitive neuropsychological perspective*. SERON X, DELOCHE G (eds). Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum, 1987 : 1-25

STARKEY P, COOPER RG. Perception of numbers by human infants. *Science* 1980, **210** : 1033-1035

STARKEY P, KLEIN A. Fostering parental support for children's mathematical development: An intervention with Head Start families. *Early Education and Development* 2000, **11** : 659-680

STARKEY P, SPELKE ES, GELMAN R. Numerical abstraction by human infants. *Cognition* 1990, **36** : 97-127

STRANG JD, ROURKE BP. Concept-formation / nonverbal reasoning abilities of children who exhibit specific academic problems with arithmetic. *Journal of Clinical Child Psychology* 1983, **12** : 33-39

STRAUSS MS, CURTIS LE. Development of numerical concepts in infancy. In : *Origins of cognitive skills*. SOPHIAN C (ed). Hillsdale, NJ, LEA, 1984

SUTARIA SD. *Specific learning disabilities: Nature and needs*. Springfield, IL, Charles C. Thomas, 1985

SVENSON O, BROQUIST S. Strategies for solving simple additions problems: A comparison of normal and subnormal children. *Scandinavian Journal of Psychology* 1975, **16** : 143-151

- SWANSON HL. Working memory in learning disability subgroups. *Journal of Experimental Child Psychology* 1993, **56** : 87-114
- TEMPLE CM. Digit dyslexia: A category-specific disorder in developmental dyscalculia. *Cognitive Neuropsychology* 1989, **6** : 93-116
- TEMPLE CM. Procedural dyscalculia and number fact dyscalculia: Double dissociation in developmental dyscalculia. *Cognitive Neuropsychology* 1991, **8** : 155-176
- TEMPLE CM. *Developmental cognitive neuropsychology*. Hove, UK, Psychology Press, 1997
- TEMPLE CM. Developmental dyscalculia. In : *Handbook of neuropsychology*. RAPIN I, SEGALOWITZ SG, SIDNEY J (eds). Vol 7, New York, NY, Elsevier, 1992 : 211-222
- TEMPLE CM, SHERWOOD S. Representation and retrieval of arithmetic facts: Developmental difficulties. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 2002, **55** : 733-752
- THEVENOT C, BARROUILLET P, FAYOL M. Algorithmic solution of arithmetic problems and operand-answer associations in long term memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 2001, **54** : 599-611
- TRUNDLEY R. The Devon Raising Attainment in Numeracy Project, 1997-1998. Final Report. Devon County Council, Devon Curriculum Services, 1998
- ULLER C, CAREY S, HUNTNER-FENNER G, KLATT L. What representation might underlie infant numerical knowledge? *Cognitive Development* 1999, **14** : 1-36
- VAN HOUT A. Dyscalculies développementales. In : *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant*. VAN HOUT A, MELJAC C (eds). Masson, Paris, 2001 : 139-170
- VAN LUIT JEH, SCHOPMAN EAM. Improving early numeracy of young children with special educational needs. *Remedial and Special Education* 2000, **21** : 27-40
- VON ASTER M. Developmental dyscalculia in children: Review of the literature and clinical validation. *Acta Paedopsychiatrica* 1994, **56** : 169-178
- VON ASTER M. Developmental cognitive neuropsychology of number processing and calculations: Varieties of developmental dyscalculia. *European Child & Adolescent Psychiatry* 2000, **9** : II41-57
- WEINTRAUB S, MESULAM MM. Developmental learning disabilities of the right hemisphere. *Archives of Neurology* 1983, **40** : 464-468
- WECHSLER D. *The Wechsler Intelligence Scale for Children-Revised*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation, 1974
- WHITE J, MOFFITT TE, SILVA PA. Neuropsychological and socio-emotional correlates of specific-arithmetic disability. *Archives of Clinical Neuropsychology* 1992, **7** : 1-16
- WILLS KE, HOLMBECK GM, DILLON K, MCLONE DG. Intelligence and achievement in children with myelomeningocele. *Journal of Pediatric Psychology* 1990, **15** : 161-176
- WRIGHT RJ, MARTLAND J, STAFFORD AK. *Early numeracy: Assessment for teaching and intervention*. Corwin Press, Thousand oaks, CA, 2000

WRIGHT RJ, MARTLAND J, STAFFORD AK, STANGER G. Teaching number: Advancing children's skills and strategies. Thousand oaks, CA, Corwin Press, 2002

WYNN K. Addition and subtraction in human infants. *Nature* 1992, **358** : 748-750

XU F, SPELKE ES. Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition* 2000, **74** : B1-B11