

Synopsis des concepts sur l'acalculie acquise

■ A. von Gunten, J. Wertheimer

Policlinique Universitaire de Psychogériatrie et Consultation de la Mémoire, Service Universitaire de Psychogériatrie, Lausanne

Summary

von Gunten A, Wertheimer J. A synoptic review of the concepts on acquired acalculia. Schweiz Arch Neurol Psychiatr 2000;151:208–17.

Numbers are ubiquitous in our world which is ruled by the laws of computation and economics and, yet, the cognitive processes underlying calculation and its impairments are still not well understood. The diversity of the conceptual approaches to this issue bears witness to this lack of thorough understanding. Historically, acalculia acquires the status of a cognitive capacity to be studied in its own right during the period of classical neuropsychology with its quest for the cerebral localisation of cognitive functions. More recently, cognitive neuropsychology started rivalling classical neuropsychology in importance. The number of more original views outside the domains of classical and cognitive neuropsychology is scarce.

This synopsis of the conceptual frameworks used in acalculia research suggests that the integrated modular view put forward by Moscovitch and Umiltà should inspire further research. Moreover, the macro- and microtemporal dynamics of cognitive processes involved in calculation ought to be taken into account to transform the so far purely representational theories into operational theories of calculation and its disorders.

Keywords: acalculia; acquired

Résumé

Malgré l'omniprésence des chiffres dans notre monde régi par l'ordinateur et la réflexion éco-

nomique, les processus cognitifs sous-jacents au calcul et leurs troubles sont encore mal connus. En témoigne la diversité des approches conceptuelles dans la littérature sur le sujet. Historiquement, l'individuation de l'acalculie en tant que capacité cognitive scientifiquement reconnue émerge dans une période neuropsychologique classique avec la question de la localisation cérébrale des fonctions cognitives. Plus récemment, la neuropsychologie classique a cédé du terrain à la neuropsychologie cognitive. Ne sont pas légion des points de vue plus originaux qui sortent de l'axe de la neuropsychologie classique ou cognitive.

Ce synopsis fait le point des divers concepts et suggère que la recherche sur le calcul et ses troubles s'oriente d'après un concept-clé qu'est le modèle modulaire intégré de Moscovitch et Umiltà et qu'elle tente ultérieurement d'intégrer la dynamique macro- et microtemporelle des processus cognitifs afin de transformer les théories jusqu'ici purement représentationnelles en théories opérationnelles du calcul et de ses troubles.

Mots clés: acalculie; acquis

Introduction

La préparation d'une thèse sur les troubles du calcul chez des patients avec une maladie d'Alzheimer nous a amené à nous interroger sur les différents concepts que les chercheurs utilisent pour comprendre le calcul et ses déficits. Avec cet article, nous voulons donner un synopsis des différents concepts ou modèles utilisés et, à partir d'eux, discuter quelques points que nous jugeons pertinents pour de futures recherches.

Peut-être le premier à écrire sur les mécanismes psychologiques normaux intervenant lors de la manipulation des chiffres est-il Sir Francis Galton [1] qui se base sur une approche introspective. Pendant les années suivantes, l'étude psychopathologique des troubles du calcul n'est qu'un chapitre annexe du champ des investigations aphasiologiques (p.ex. Bastian [2]). En 1920 seulement, l'étude des troubles du calcul trouve un véritable

Correspondance:
Dr Armin von Gunten
Policlinique Universitaire de Psychogériatrie
et Consultation de la Mémoire
Service Universitaire de Psychogériatrie
10, avenue de Morges
CH-1004 Lausanne
e-mail: Armin.Von-Gunten@inst.hospvd.ch

droit de cité avec l'introduction du terme d'«acalculie» par Henschen [3] et c'est dès ce moment-là que l'approche psychologique ou psychopathologique des troubles du calcul tente de décomposer le calcul en ses constituants. La première approche est celle de la neuropsychologie localisationniste classique qui essaie de relier fonction cognitive et localisation cérébrale. Berger [4] ainsi que Hécaen et ses collaborateurs [5] déterminent deux points culminants de cette période où le possible primat d'une fonction neuropsychologique sur une autre alimente la réflexion. Ce sont les tentatives classificatoires des acalculies dont certaines, comme celles des auteurs précités, sont encore utilisées de nos jours. Le travail de Warrington en 1982 [6] sonne le glas de cette période historique pour annoncer la dernière toujours actuelle, qui s'intéresse davantage aux mécanismes du calcul et de ses troubles selon une approche cognitiviste et expérimentale.

Neuropsychologie classique et localisation cérébrale

Neuropsychologie classique:
le calcul est-il dépendant ou indépendant
d'autres fonctions cognitives?

L'individuation lente de l'acalculie sur le plan terminologique est révélatrice de la complexité des phénomènes qui se déroulent lorsque nous calculons. Cette complexité résulte de la contribution potentielle au calcul de diverses fonctions cognitives individualisées par la neuropsychologie classique. En effet, le calcul mobilise au moins autant d'éléments constitutifs que l'attention, la représentation symbolique, le langage parlé et écrit, les facultés visuo-spatiales, la perception, la motricité fine, mais aussi la motivation, la volition et d'autres. La participation de ces différentes fonctions soulève la question de la possibilité du primat d'une fonction cognitive sur une autre dans la production du calcul et, en conséquence, d'une acalculie. Rappelons qu'initialement la recherche sur les troubles du calcul est entièrement sous l'égide de l'aphasiologie, la grande dévoratrice de l'époque. Mais le primat de l'aphasie est battu en brèche par le travail de Lewandowsky et Stadelmann [7] qui tentent de séparer la psychopathologie du calcul de celle de l'aphasie. Ainsi, ces auteurs pensent-ils – sur la base d'une observation clinique unique – que les déficits de leur patient ne s'expliquent ni par une diminution de l'intelligence ni par une atteinte phasique, mais bien par l'altération d'une composante optique

qui contribue à la capacité de calculer. Les auteurs identifient le déficit de base comme étant une diminution de la capacité de reproduire optiquement les chiffres; le patient lui-même se dit incapable de se représenter mentalement les chiffres et les nombres écrits. Henschen [3] introduit le terme d'acalculie et affirme, quelques années plus tard [8], l'existence de centres spécialisés pour le calcul qui seraient indépendants des fonctions, en particulier linguistiques et musicales. Berger [4] introduit les notions d'acalculie primaire et d'acalculie secondaire définissant ainsi clairement qu'il existe des troubles du calcul qui ne s'expliquent pas par une atteinte des fonctions cognitives telles que celle de la mémoire et de l'attention ou par la présence de persévérations, de troubles paraphasiques et paragraphiques, voire de plusieurs déficits à la fois. Berger retient que l'acalculie primaire est relativement rare, car chez 3 patients seulement sur 18, il n'arrive pas à expliquer le trouble du calcul observé par une altération cognitive concomitante. Hécaen et ses collaborateurs [5] présentent une classification en vogue encore aujourd'hui. Ces auteurs établissent trois groupes: (1) un groupe où prédominent les troubles de la lecture et de l'écriture des nombres, liés ou non à une alexie ou une agraphie verbale; (2) un groupe où prédominent les troubles de l'organisation spatiale des chiffres; (3) un groupe où prédominent les troubles de la conduite des opérations arithmétiques qu'ils appellent anarithmétique. Ces auteurs précisent d'emblée que dans aucun de leur 183 cas, ils n'observent une acalculie pure.

La *difficulté visuo-spatiale* est considérée comme primordiale par Lewandowsky et Stadelmann [7] et bien des auteurs abondent dans ce sens ou lui attribuent pour le moins un rôle important dans le calcul [1, 3, 5, 9–16]. La difficulté visuo-spatiale englobe plusieurs troubles du calcul. Il peut s'agir des difficultés résultant d'une hémiparésie après lésion hémisphérique droite. Souvent, cependant, les auteurs précités se réfèrent au traitement imagé de chiffres qui seraient représentés sur un médium spatial comme p.ex. une ligne numérique [1], ce qui permettrait ainsi de développer, par analogie spatiale, une conscience de magnitude numérique et finalement le concept de numérosité. Cependant, selon Krapf [17], la fonction visuo-spatiale est considérée par la plupart de ces auteurs qui l'ont précédé sous son angle exclusivement *perceptif* ou sensoriel. Il regroupe sous ce terme la conscience de magnitude et le concept de numérosité qui s'en déduit. Krapf reconnaît l'importance des aspects sensoriels, mais il leur oppose une *composante constructive* à caractère d'action. Les quatre opérations arithmétiques

de base, écrites ou orales, dit-il, sont des abstractions de comment sont manipulés des ensembles concrets. Ces acalculies «motrices» découleraient d'une atteinte pariétale et pourraient en plus être séparées en acalculie constructive et idéocinétique. Les patients souffrant d'une acalculie constructive ne sont plus en mesure de manipuler les chiffres et nombres dans l'espace numérique (par exemple: $43 - 25$ est calculé comme ceci: $43 - 20 + 5$). Dans l'acalculie idéocinétique, l'idée du calcul à effectuer ne peut plus être transformée en réalité arithmétique; ainsi, à titre d'exemple, le patient concerné n'effectue-t-il pas la division demandée, mais procède par défaut à une addition. La relation avec l'apraxie constructive n'est pas abordée par Krapf [17], mais la concomitance de celle-ci avec des troubles du calcul en général est observée par Janota [18] et Hécaen et al. [5], plus lorsque le déficit du calcul est de nature spatiale que dans le cas d'une acalculie aphasique ou d'une anarithmie.

L'idée que l'acalculie est la conséquence d'un trouble phasique remonte au début de l'intérêt scientifique pour les troubles du calcul [2]. Sittig [19] décrit des troubles de l'écriture des nombres chez des aphasiques. Il fait remarquer que, chez la plupart des aphasiques, la maîtrise de la manipulation des chiffres et des nombres est relativement meilleure que celle concernant les fonctions linguistiques à proprement parler. La classification du groupe de Hécaen [5] attribue une place prépondérante aux troubles linguistiques comme générateurs d'une acalculie. Ces auteurs notent que les aphasiques ont souvent des difficultés au calcul, mais que d'autre part, des troubles de la notation numérique peuvent se rencontrer en dehors de toute aphasie. Benson et Denckla [20] expliquent la dyscalculie dans le syndrome de Gerstmann chez 2 de leurs patients comme un trouble paraphasique.

Des acalculies secondaires à un autre trouble instrumental que linguistique ou visuospatial ne sont que rarement rapportées. Ainsi, Ehrenwald [10] ne discute-t-il pas à sa juste valeur le déficit massif de ce que l'on qualifierait aujourd'hui de déficit de la mémoire de travail et qu'il décrit chez son patient princeps, tout en mentionnant qu'une acalculie peut être secondaire à divers troubles instrumentaux. Cohn [14] est un des rares auteurs à attribuer explicitement une importance prépondérante au processus mnésique pour les opérations arithmétiques. Bien plus récemment, Takayama et ses collègues [21] décrivent 3 patients avec une lésion vasculaire de la région pariétale gauche; ils expliquent l'acalculie isolée de ces personnes par une défaillance

de la mémoire de travail. De surcroît, ce déficit de la mémoire de travail serait spécifique à la fonction du calcul.

Une dyscalculie secondaire à un trouble exécutif est postulée surtout depuis Grewel [22] (1952) et Luria [23]. Dans le cas d'une origine exécutive de l'acalculie, les déficits ne deviennent pas sans autre évidents à l'exécution d'opérations arithmétiques, sauf parfois en raisons des troubles attentionnels et des persévérations. Par contre et selon d'autres auteurs, ils apparaissent lorsque le patient doit résoudre des problèmes mathématiques plus complexes [24]. Cela se rencontre particulièrement lorsque le patient est censé convertir un problème mathématique posé en prose en sa forme algébrique. La notion du trouble exécutif lors d'une discussion des acalculies justifie la mention du travail de Mazzuchi et ses collègues [25], bien que ces auteurs ne discutent pas clairement leur observation en ce terme. Ils constatent, chez un patient, la dissociation des capacités du calcul élémentaire et des capacités mathématiques avec préservation de ces dernières et, partiellement, de l'addition et de la soustraction. Ils proposent une classification du calcul à quatre niveaux avec la suggestion que les compartiments ou niveaux peuvent être touchés sélectivement par un processus pathologique: un niveau automatique (faits arithmétiques), un niveau du calcul élémentaire englobant les quatre opérations de base avec une dissociation entre le tandem addition/soustraction et celui de la multiplication/division, un 3^e niveau de «règles fixes» mathématiques et algébriques, et finalement un niveau de programmation et de conceptualisation des problèmes mathématiques. Un exemple d'une atteinte sélective est fourni par Hittmair-Delazer et collègues [26] qui décrivent un patient incapable de faire des calculs simples, mais qui n'a pas de difficultés à l'algèbre ou à l'application des principes arithmétiques: son savoir conceptuel est resté intact.

L'acalculie peut aussi être secondaire à plusieurs troubles instrumentaux concomitants ou à une atteinte générale de l'intelligence comme ceci est avancé par exemple dans la conception de Collignon et ses collaborateurs [27]. En effet, ces auteurs ne pensent pas que «les troubles du calcul au sens large résultent d'une altération sélective d'un comportement unique».

Rares sont finalement les auteurs qui pensent avoir observé un cas d'anarithmie pure, à savoir un trouble du calcul qui est indépendant d'un autre déficit neuropsychologique concomitant [28, 29].

L'interrogation sur le primat d'une fonction neuropsychologique est étroitement liée à la question de sa localisation dans le cerveau. Si l'acalculie est considérée comme secondaire à un trouble instrumental spécifique (linguistique, visuo-spatial, visuo-constructif, mnésique) ou exécutif, la discussion de la localisation cérébrale de l'acalculie renvoie à la localisation cérébrale du trouble de base. Ainsi, à titre d'exemple déjà discuté, Krapf [17] stipule une atteinte pariétale comme responsable des acalculies constructive et idéocinétique. Quelques considérations concernant la localisation des lésions cérébrales pouvant s'accompagner de difficultés du calcul méritent cependant que l'on s'y arrête un instant. Ainsi, Peritz considère-t-il déjà en 1918 [9] que l'acalculie résulte spécifiquement d'une lésion du *gyrus angulaire gauche*. Henschen [3] indique le *gyrus angulaire* – sans spécifier la latéralisation – pour ce qui est des déficits de lecture et d'écriture des nombres. Le syndrome de Gerstmann dont l'association complète de l'acalculie, de l'agraphie, de la désorientation droite-gauche et de l'agnosie digitale est décrite en 1930 [30], est sujet à de nombreuses controverses jusqu'à ce jour. Un débat presque passionnel oppose les défenseurs du syndrome à ceux qui pensent qu'il ne correspond pas à une réalité. La constellation complète du syndrome permettrait cependant, selon les défenseurs, de conclure à l'existence d'une lésion pariétale gauche. L'atteinte pariétale inférieure en cas de trouble de la manipulation des quantités numériques sans atteinte des faits arithmétiques est à nouveau défendue par une publication très récente [31] et soutenue par des études analysant les performances arithmétiques et leurs corrélations avec le métabolisme cérébral régional chez des personnes normales [32] ou encore chez des patients souffrant de la maladie d'Alzheimer [33]. Hécaen et ses collaborateurs [5] présentent une classification des acalculies qui est, nous l'avons vu, toujours utilisée. Toutefois, la description de ces auteurs se limite aux troubles rencontrés en cas d'atteintes *rétrorolandiques*. Par ailleurs, cette classification suggère l'existence d'acalculies prérolandiques ou frontales connues depuis longtemps, mais dont la réalité a été mieux conceptualisée par Grewel [22] et Luria [23].

Bien que la participation de l'hémisphère gauche dans le calcul soit considérée comme primordiale, la contribution de *l'hémisphère droit* est déjà reconnue par Henschen [8] qui évoque la possibilité d'une compensation partielle du trouble par cet hémisphère en cas de lésions gauches éten-

dues, pour le moins en ce qui concerne de simples tâches comme le comptage et l'énumération. Une observation particulièrement intéressante dont l'hémisphère droit pourrait être tenu comme responsable est décrite par Assal et Jacot-Descombes [34] – et plus tard par Dehaene et Cohen [35]: c'est le cas de patients aphasiques qui préservent une certaine intuition arithmétique ou, en d'autres termes, pour qui un traitement non-verbal approximatif des chiffres existe sous la dépendance de l'hémisphère droit alors que le système du traitement numérique exact est déficitaire. Si l'examineur recourt à une présentation à choix multiples des résultats du problème arithmétique, ces patients indiquent souvent les réponses justes faisant ainsi preuve d'un traitement arithmétique. Ferro et Botelho [36] étudient l'acalculie par rapport à la corrélation anatomique chez des patients après une lésion hémisphérique gauche. Ils ne trouvent pas de différences significatives quant à la localisation lésionnelle et quant à la présence ou l'absence d'une acalculie. Finalement, l'impression que le calcul soit confiné aux structures corticales est battue en brèche par des observations intra-opératoires faites par Ojemann [37] et elle est étayée plus récemment par des études de cas par Dehaene et Cohen [31]. Ces auteurs suggèrent qu'un réseau *sous-cortical* gauche contribue de façon substantielle aux faits arithmétiques, c'est-à-dire des processus hautement automatisés, appelés dans leur ensemble la «route directe» qui serait essentiellement aveugle à la signification des chiffres manipulés. Le rôle des structures sous-corticales pour le calcul est également mentionné par Ferro et Botelho [36] qui observent plusieurs patients acalculiques sans lésion corticale mais qui expliquent ces cas d'acalculies sous-corticales par un probable effet de diaschisis, à savoir un déficit qu'une lésion cérébrale exerce à distance ailleurs dans le cerveau.

Neuropsychologie cognitive

Tout au long de l'histoire de la recherche sur les acalculies apparaissent des concepts que l'on qualifierait aujourd'hui de cognitifs et qui s'interrogent davantage sur les mécanismes des processus de la pensée et de ses troubles que sur la localisation de l'atteinte cérébrale. Ainsi Ehrenwald [10] décrit-il une *forme ordinative* d'acalculie dans laquelle le calcul est touché dans sa composante non-automatique; un déficit orditatif n'est pas seulement observé pour le calcul, mais encore pour la perception du temps, l'orientation spatiale ainsi que le dessin. Le patient d'Ehrenwald est décrit

comme ayant une lésion pariéto-occipitale bilatérale, mais ce concept rappelle les difficultés exécutives au calcul que Luria décrit chez des patients frontaux. De manière implicite, une distinction est donc faite entre une acalculie instrumentale et une acalculie exécutive. Ehrenwald parle en effet de «Störungen spezifisch gerichteter zentraler Einstellungen, die die betreffenden Leistungen vermitteln», donc d'une fonction centrale et hiérarchiquement supérieure dont l'atteinte entraîne un déficit commun pour plusieurs capacités cognitives à la fois. Lindqvist [38] pense également que le déficit du calcul ne peut être isolé d'autres troubles; il postule deux perturbations de base, à savoir l'altération d'une *approche globale* d'une part et l'incapacité d'un *fractionnement* d'autre part. Lindqvist s'appuie sur l'observation de 2 patients. Pour le premier, «le nombre est conçu immédiatement comme un tout, en même temps qu'il cesse d'être considéré comme formé de parties». Pour le 2^e patient, «le nombre est considéré de préférence sous son aspect d'unités sériées, en même temps que la conception immédiate de totalité fait défaut». Mais le trouble du calcul n'est pas isolé, car dans d'autres domaines, on observe des altérations qui sont de la même nature. L'observation de Lindqvist n'est pas sans rappeler la distinction moderne entre les agraphies/alexies profondes et de surface. Proche des deux auteurs précédents, se situe Conrad [12] qui émet l'hypothèse d'un traitement simultané de la perception d'un ensemble opposé à un traitement à partir des composantes de cet ensemble, dichotomie qui s'applique, encore une fois, aussi bien au calcul qu'à d'autres troubles neuropsychologiques observés.

Les travaux de ces trois auteurs sont des précurseurs de la période qualifiée ici comme celle de la neuropsychologie cognitive. L'entrée définitive dans cette période quant au calcul est annoncée par le travail de Warrington [6] qui examine un patient avec un hématome intra-cérébral pariéto-occipital gauche dont le seul déficit persistant est une acalculie. Celle-ci est caractérisée par la dissociation entre les faits arithmétiques qui sont perturbés et les procédures qui restent intactes. Après une analyse minutieuse, l'auteur conclut que cette observation s'explique par un défaut d'accès aux faits arithmétiques. Warrington poursuit en disant que cette constellation pathologique est en faveur du concept que les systèmes de mémoire sémantique sont organisés en catégories; une catégorie en est la numérosité dont une sous-catégorie (l'accès aux faits arithmétiques) est défectueuse chez le patient décrit. Cipolotti et ses collègues [39] reprennent cette réflexion sur la

base d'une observation clinique d'un patient incapable de traiter les chiffres au-dessus de 4, dans toutes les modalités, alors qu'il n'avait que très peu de déficits pour ceux de 1 à 4. Ils interprètent ce déficit – à l'instar de Warrington – comme la perte d'une sous-catégorie sémantique spécifique aux chiffres concernés.

Une distinction entre les modèles du calcul *sémantique* [40–42], *asémantique* [43–46], et *mixte* [39, 47] est faite depuis peu. Le modèle sémantique postule l'existence d'une codification abstraite des chiffres traités et s'oppose en ce point aux modèles asémantiques. Dans le modèle de McCloskey et Caramazza, chaque nombre est représenté en tant que code sémantique abstrait, en l'occurrence un code logarithmique (20 ou vingt sont représentés les deux par 2×10 à la puissance 1). A l'opposé de cette conception dite sémantique se trouvent Deloche et Seron [43, 45]. Ces chercheurs utilisent un setting expérimental pour tester la manière employée par des patients aphasiques de transcrire les nombres-mots en formes digitales et pour en répertorier les différentes erreurs observées. Ils interprètent leurs données en mettant en relief le transcodage asémantique: ce modèle propose que le transcodage des nombres se fait, certes, par l'application de règles syntaxiques, mais sans l'interposition d'une représentation abstraite entre le code d'entrée et le code de sortie. Cipolotti et al. [39, 47] se basent sur des observations de cas lorsqu'ils préconisent une position intermédiaire ou mixte, à savoir la nécessité d'algorithmes de transcodage asémantique mais aussi celle d'une représentation sémantique.

Clark et Campell [46] proposent la *théorie de l'encodage complexe* (encoding complex theory) qui est de nature asémantique et qui assume que le calcul et les processus qui sont liés à lui sont basés sur des codes numériques spécifiques en fonction de la modalité (p.ex. nombre représenté par un nombre arabe [2] ou un mot [deux]). Ces codes peuvent être interconnectés sans médiation d'un code abstrait. Ils contestent en effet l'adéquation du code abstrait suggérant que cette assumption ne résout pas les questions liées à la représentation des nombres. Toutefois, l'expérimentation de Brysbaert [48] sur la lecture de nombres arabes de 1 à 99 n'est en accord ni avec la position sémantique au sens d'un code abstrait ni avec celle, asémantique. Toutefois, l'interprétation de cette expérimentation s'approche de la position sémantique en ceci que Brysbaert suggère que les nombres sont bel et bien représentés mais sur une ligne analogue logarithmique; en d'autres termes, la représentation est analogue et non pas abstraite ce qui rappelle la

conclusion de l'approche introspective de Galton au siècle passé [1].

La variabilité des troubles du calcul et les dissociations observées avec l'atteinte d'un ou de plusieurs compartiments renvoient à la question de l'organisation *modulaire* du calcul. Fodor (cité d'après Shallice [49]) définit les caractéristiques du module: «domain specificity, mandatory operation, limited access, fast operation, information encapsulation, shallow output, fixed neural architecture, specific breakdown patterns, fixed ontology», dont l'exemple typique serait les «in-pit systems». Contrairement à ceux-ci, il pense que les systèmes dits centraux sont caractérisés par un type de fonctionnement équipotentiel. En recourant à l'exemple de l'acalculie, Shallice [49], toutefois, argumente que les systèmes centraux doivent être divisés en sous-unités et que certains d'entre eux semblent être modulaires. Cette tension théorique est déjà implicite à l'interrogation de la neuropsychologie classique et trouve son expression dans les conceptions d'inspiration modulaire selon lesquelles une fonction instrumentale a la priorité sur une autre fonction en terme d'importance pour le calcul et dans la mesure où il n'y a ni une région spécifique à elle seule ni un hémisphère seul impliqués dans le calcul [50]. Cette vue du calcul est de type modulaire. Un modèle modulaire récent est celui de McCloskey et Caramazza [40, 42]. Ces auteurs présentent un modèle de traitement d'information du calcul qui différencie deux composantes principales, à savoir le système de traitement des nombres (number processing system) et le système de calcul (calculation system). Chacun des deux systèmes se subdivise en d'autres entités. Ainsi, à l'intérieur du système de traitement des chiffres trouve-t-on trois subdivisions binaires indépendantes: (a) compréhension versus production de chiffres, (b) traitement de chiffres digitaux versus celui de nombres-mots et (c) traitement phonologique versus traitement graphémique. Le système de calcul quant à lui est divisé en une unité chargée de traiter les symboles arithmétiques, une autre responsable de l'accès aux faits arithmétiques de base et la troisième qui permet l'exécution des opérations arithmétiques à proprement parler.

A l'opposé du modèle modulaire se trouvent Clark et Campbell [46] qui estiment à leur tour que les divers mécanismes associatifs, sémantiques et linguistiques impliqués dans le processus du calcul sont à tel point interconnectés qu'une forme prononcée de modularité leur paraît improbable. Cette théorie de l'encodage complexe postule donc une vue de type *équipotentiel*.

Autres concepts sur le calcul

Quelques concepts que l'on pourrait qualifier de plus originaux sortent quelque peu du cadre de la neuropsychologie classique et/ou cognitive. C'est le cas de celui de Sittig [19] qui rappelle qu'il a pu observer les mêmes troubles de l'écriture des chiffres d'une part chez une hystérique et d'autre part chez un patient lorsque celui-ci souffrait d'une «attaque paralytique avec déficience phasique». En d'autres termes, Sittig pense qu'un même trouble du calcul peut résulter d'une atteinte aussi bien *organique que fonctionnelle*. En outre, il rend attentif au développement progressif de la capacité arithmétique: il observe que, chez les acalculiques, la notion de la valeur positionnelle des chiffres dans les nombres disparaît la première. Il suggère donc une explication *ontogénétique*, car cette capacité serait la dernière astuce acquise par l'homme dans son évolution vers le «homo mathematicus». Pontius [51] décrit le lien entre une mauvaise représentation des doigts (sur dessin) et une faible capacité arithmétique dans une population de Nouvelle-Guinée et d'Indonésie. Elle voit en ce phénomène une version écologique du syndrome de Gerstmann par opposition à la variante pathologique liée à la lésion pariétale gauche. Cet exemple est à la base de sa définition d'une neuropsychiatrie *écologique* évolutionnaire. Dans ce contexte, il convient également de revenir à Berger [4]. En effet, cet auteur est peut-être le premier et l'un des rares à attirer notre attention sur le fait qu'il faudrait prendre plus en considération les *particularités de chaque individu* dans sa manière de calculer. Peu d'auteurs, en dehors de Sittig [19] se soucient de l'éventuelle dépendance du trouble du calcul de son *étiologie* ou, autrement dit, de la nature du processus pathologique sous-jacent. Abts et ses collègues [52] présentent un patient avec des signes neuropsychologiques – dont une acalculie – qui sont intermittents et qui sont l'expression précoce d'une encéphalopathie hépatique en l'absence d'un état confusionnel: on pourrait l'appeler *acalculie paroxystique ou intermittente*, comme ceci peut se voir dans le cadre d'AIT ou de crises épileptiques focalisées [53].

Discussion

Le synopsis des concepts sur l'acalculie acquise permet de retenir deux approches théoriques principales: celle de la neuropsychologie classique et celle de la neuropsychologie cognitive. Rares sont les travaux qui s'éloignent de ces deux approches.

La neuropsychologie classique *et* la neuropsychologie cognitive ont en commun l'approche analytique qui tente de décomposer les capacités cognitives, comme le calcul, en des sous-unités fonctionnelles appelées modules, capables de traiter seulement des informations spécifiques et restreintes à l'intérieur du système global de traitement d'information; cette notion de la *modularité* est implicite à la quasi-totalité des travaux. Contrairement à l'approche cognitive, la neuropsychologie classique se préoccupe de la localisation des fonctions en tentant de leur attribuer une géographie cérébrale bien définie. Il convient cependant de noter que cet aspect de localisation identifiable dans le cerveau est, certes, pratiquement corollaire avec la notion de module, mais il ne s'agit pas d'un attribut sine qua non des modules. Ou, pour reprendre les mots de Kahn et Whitaker [50], le point de vue morphologique et géographique ne permet guère de trancher entre les arguments pour et contre la modularité. Aux modèles modulaires s'oppose la vue selon laquelle le calcul est une fonction équipotentielle comme le stipule la théorie de l'encodage complexe; en d'autres termes, il ne serait pas possible de décomposer le calcul en des catégories fonctionnelles et/ou anatomiques. La proposition de l'encodage complexe correspond à une simplification théorique par rapport au modèle modulaire. Elle survient à un moment où les réseaux neuronaux sont sur l'avant-plan des théories scientifiques; mais elle semble aussi être la réponse à la complexité croissante des théories autour de l'objet scientifique représenté par le calcul. La théorie de l'encodage complexe a bel et bien l'avantage d'être un substrat théorique simple par lequel beaucoup de phénomènes observés en clinique et en expérimentation peuvent trouver une explication, mais malheureusement seulement en apparence. Elle est trop générale et semble avoir, comme le soulèvent Deloche et Seron [45], le grand désavantage de ne plus guère être falsifiable (au sens de Popper). En dehors de la contribution de cette hypothèse sur la discussion de la dichotomie sémantique versus asémantique du calcul, elle ne dépasse guère le constat aujourd'hui banal que le calcul est une fonction cérébrale soustendue par l'interaction des cellules nerveuses. Par conséquent, il faudra revenir à une conception plus modulaire bien qu'il faille sans doute quelques adaptations, qui s'approche partiellement de l'idée de l'encodage complexe. Ainsi, une réinterprétation du concept fodorien rigide du module est-elle nécessaire. Moscovitch et Umilta [54] présentent un modèle modulaire plus nuancé. Ils montrent une distinction subtile entre trois types de mo-

dules: (a) module de base, de type I qui s'apparente au module de Fodor, (b) module assemblé inné, de type II et (c) module assemblé par expérience, de type III. Par ailleurs, ils retiennent l'existence de processus centraux et postulent, entre autre, l'intervention de ceux-ci dans l'assemblage des composantes de base en modules de type II et III. En dehors de la réinterprétation du modèle fodorien du module, la vue de Moscovitch et Umilta apporte plusieurs autres avantages. Le premier est celui de rapprocher la neuropsychologie cognitive du concept classique, p.ex. en stipulant l'importance des processus dits centraux que l'on peut rapprocher des processus exécutifs qui, à leur tour, renvoient directement aux lobes préfrontaux et donc à une localisation cérébrale, certes encore très grossière. Le «triple code model» de Dehaene et Cohen [31] tient compte de divers modules de traitement d'information et les place sous l'égide de processus de planification ce qui nous permet de le rapprocher de la conception de Moscovitch et Umilta [54]. Le «triple code model» stipule l'existence d'un code visuel arabe localisable dans les régions occipito-temporales ventrales et d'un code analogique de quantité ou de magnitude dans les aires pariétales inférieures. Il tient en plus compte de l'hypothèse que certains aspects du calcul comme celui que les faits arithmétiques s'automatisent sous forme d'un code verbal par l'intermédiaire d'une boucle cortico-sous-corticale. Ce modèle a ainsi le mérite de tenter une intégration de l'approche localisationnelle classique et de l'approche cognitive. Toutefois, les mécanismes d'assemblage modulaire ne sont pas abordés dans ce modèle. Et c'est à ce point qu'intervient le 2^e avantage du modèle de Moscovitch et Umilta qu'est celui d'élargir le débat des acalculies acquises vers celui des dyscalculies dues à un trouble du développement – qui ne sont toutefois pas considérées dans ce texte – car il convient d'expliquer la création et l'assemblage des modules du calcul si nous voulons mieux le comprendre. C'est dire que le concept de Moscovitch et Umilta pointe implicitement, mais sans être capable de l'expliquer lui-même, en direction de la nécessité d'une théorie *opérationnelle* («Comment les représentations cérébrales sont-elles articulées, dans le temps, les unes avec les autres?») du calcul, alors que tous les modèles qui ont inspiré la recherche jusqu'ici sont de type *représentationnel* («Comment une donnée est-elle représentée par le cerveau?») et donc quelque peu statiques. Un facteur essentiel dont une théorie opérationnelle doit impérativement tenir compte est donc le temps qui n'a jamais été considéré dans les travaux sur l'acalculie acquise. L'idée de l'assemblage obli-

gatoire des modules, tel qu'il est suggéré par le modèle modulaire de Moscovitch et Umiltà [54], pose la question de l'évolution dans le temps de la fonction globale qu'est le calcul et stipule implicitement le remodelage dynamique et progressif de l'interaction entre les différents modules. En effet, savoir pourquoi un sous-module est activé à un moment précis et pertinent dans l'exécution d'une opération arithmétique ne s'explique pas par la connaissance des différents modules existants. Toutefois, il semble que le temps doit être considéré par rapport à une double dimension: une dimension ou un zoom «macrotemporel» et une dimension «microtemporelle». Nous entendons par «dimension *macrotemporelle*» l'observation que les processus cognitifs restent relativement stables au long cours. En effet, l'automatisation d'un processus cognitif, comme ceci est le cas p.ex. pour le livret et la maîtrise des algorithmes arithmétiques, lui confère une relative stabilité représentationnelle. Cette stabilité est vraisemblablement possible en raison d'une représentation spatiale persistante des processus cognitifs impliqués. Un argument en faveur de la nature spatiale de la représentation est le fait que l'encodage neuronal survit à des états comateux en absence d'une lésion cérébrale localisable bien entendu [55]. En bref, la dimension «macrotemporelle» est celle du temps figé tel qu'il est considéré implicitement dans les théories représentationnelles. La notion de la dimension «microtemporelle» par contre se réfère, d'une part, à la dynamique de l'assemblage et du remodelage des modules et, d'autre part, à la durée et au comment de l'interaction dynamique entre les différents modules ainsi qu'aux processus de type central au moment même, dans le hic et nunc, de l'exécution d'un calcul. Le premier processus, à savoir l'assemblage modulaire commence à livrer certains de ses secrets. On peut en effet faire l'hypothèse que les modules naissent – pour une fonction cognitive supérieure comme le calcul – par synchronisation neuronale répétée qui gèle les assemblées neuronales par consolidation synaptique (binding) [56]. Ce processus de binding «fige» les assemblées neuronales en représentations spatiales. Le 2^e processus, à savoir la mise ensemble de façon rapidement changeante de différents modules consolidés à un moment donné, c'est-à-dire au moment de l'exécution d'un calcul, renvoie aux processus exécutifs sur lesquels nous ignorons à peu près tout concernant les mécanismes neurobiologiques qui les soutiennent. En particulier, aucun modèle du calcul ne tente d'y répondre.

Les processus microtemporels de gestion doivent petit à petit être pris en considération dans la

recherche sur le calcul et ses troubles pour que nous puissions rendre compte de la complexité des observations cliniques. Une voie d'exploration potentielle nous est offerte par la neuroimagerie cérébrale dynamique. Or, force est de constater que ces nouvelles techniques n'ont pas encore permis de progrès notables dans le but de percer la cognition du calcul. Ces techniques ont pour l'instant seulement apporté quelques confirmations quant à la représentation cérébrale des éléments du calcul, mais elles devraient pouvoir nous apporter des informations pertinentes pour diriger nos connaissances sur le calcul vers des théories opérationnelles, car elles font obligatoirement glisser l'aspect microtemporel de ces processus cognitifs au centre de l'intérêt. Ceci deviendra possible une fois que les méthodes de neuroimagerie fonctionnelle permettront une meilleure résolution spatiale mais surtout temporelle.

En résumé, le synopsis des acalculies acquises suggère le maintien du modèle modulaire pour améliorer les théories représentationnelles du calcul, d'une part, et, d'autre part, de promouvoir l'approche vers des théories opérationnelles du calcul sans lesquelles nos connaissances sur le calcul et ses troubles resteront fragmentaires.

Remerciements: Les auteurs remercient la Dresse Lisa Cipolotti du National Hospital for Neurology and Neurosurgery, London, UK, pour son commentaire sur une version antérieure de cet article.

Références

- 1 Galton F. Visualised numbers. *Nature* 1880;21:252–6.
- 2 Bastian HC. Aphasie and other speech defects. London: H.K. Lewis; 1898. p. 284.
- 3 Henschen SE. Klinische und anatomische Beiträge zur Pathologie des Gehirns. Stockholm: Nordisk Bokhandel; 1920.
- 4 Berger H. Ueber Rechenstörungen bei Herderkrankungen des Grosshirns. *Arch Psychiatr Nervenkr* 1926;78:238–63.
- 5 Hécaen H, Angelergues R, Houiller S. Les variétés cliniques des acalculies au cours des lésions rétrolandiques: approche statistique du problème. *Rev Neurol* 1961;105:85–103.
- 6 Warrington EK. The fractionation of arithmetical skills: a single case study. *Q J Exp Psychol* 1982;34:31–51.
- 7 Lewandowsky M, Stadelmann E. Über einen bemerkenswerten Fall von Hirnblutung und über Rechenstörungen bei Herderkrankungen des Gehirns. *Journal für Psychologie und Neurologie* 1908;6:249–65.
- 8 Henschen SE. On the function of the right hemisphere in speech, music and calculation. *Brain* 1926;49:110–23.
- 9 Peritz G. Zur Pathopsychologie des Rechnens. *Dtsch Z Nervenheilkd* 1918;61:234–40.

- 10 Ehrenwald H. Störungen der Zeitauffassung, der räumlichen Orientierung, des Zeichnens und des Rechnens bei einem Hirnverletzten. *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie* 1931;132:518–69.
- 11 Leonhard K. Die Bedeutung optisch-räumlicher Vorstellungen für das elementare Rechnen. *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie* 1939;164:321–51.
- 12 Conrad K. Versuch einer psychologischen Analyse des Parietalsyndroms. *Monatsschrift für Psychiatrie und Neurologie* 1932;84:28–97.
- 13 Spalding JMK, Zangwill OL. Disturbance of number-form in a case of brain injury. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1950;13:24–9.
- 14 Cohn R. Dyscalculia. *Arch Neurol* 1961;4:301–7.
- 15 Dahmen W, Hartje W, Büssing A, Sturm W. Disorders of calculation in aphasic patients: spatial and verbal components. *Neuropsychologia* 1982;20:145–53.
- 16 Grafman J, Passafiume D, Faglione P, Boller F. Calculation disturbances in adults with focal hemispheric damage. *Cortex* 1982;18:37–50.
- 17 Krapf E. Ueber Akalkulie. *Archiv für Neurologie und Psychiatrie* 1937;39:330–4.
- 18 Janota O. Sur l'apraxie constructive et sur les troubles apparentés de l'aperception et de l'expression des rapports spatiaux. *Encéphale* 1938;2:173–211.
- 19 Sittig O. Ueber Störungen des Ziffernschreibens bei Aphasischen. *Zeitschrift für Pathopsychologie* 1917;3:298–306.
- 20 Benson DF, Denckla MB. Verbal paraphasia as a cause of calculation disturbances. *Arch Neurol* 1969;21:96–102.
- 21 Takayama Y, Sugishita M, Akiguchi I, Kimura J. Isolated acalculia due to left parietal lesion. *Arch Neurol* 1994;51:286–91.
- 22 Grewel F. Acalculia. *Brain* 1952;75:397–407.
- 23 Luria A. *Das Gehirn in Aktion: Einführung in die Neuropsychologie*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt-Taschenbuch-Verlag GmbH; 1992. S. 152.
- 24 Ardila A, Rosselli M. Acalculias. *Behav Neurology* 1990;3:39–48.
- 25 Mazzucchi A, Manzoni GC, Mainini P, Parma M. Il problema dell'acalculia: studio di un caso. *Riv Neurol* 1976;46:102–15.
- 26 Hittmair-Delazer M, Sailer U, Benke T. Impaired arithmetic facts but intact conceptual knowledge: a single-case study of dyscalculia. *Cortex* 1995;31:139–47.
- 27 Collignon R, Leclercq C, Mahy J. Etude de la sémiologie des troubles du calcul observés au cours des lésions corticales. *Acta Neurol Belg* 1977;77:257–75.
- 28 Benson DF, Weir WF. Acalculia: acquired anarithmetia. *Cortex* 1972;8:465–72.
- 29 Lucchelli F, De Renzi E. Primary dyscalculia after a medial frontal lesion of the left hemisphere. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1993;56:304–7.
- 30 Gerstmann J. Syndrome of finger agnosia, disorientation for left-right agraphia and acalculia. *Archives of Neurology and Psychiatry* 1940;44:398–408.
- 31 Dehaene S, Cohen L. Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex* 1997;33:219–50.
- 32 Rueckert L, Lange N, Partiot A, Appollonio I, Litvan I, Le Bihan, et al. Visualizing cortical activation during mental calculation with functional MRI. *Neuroimage* 1996;3:97–103.
- 33 Hirono N, Mori E, Ishii K, Imamura T, Shimomura T, Tanimukai S, et al. Regional metabolism: associations with dyscalculia in Alzheimer's disease. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1998;65:913–6.
- 34 Assal G, Jacot-Descombes C. Intuition arithmétique chez un acalculique. *Rev Neurol* 1984;5:374–5.
- 35 Dehaene S, Cohen L. Two mental calculation systems: a case study of severe acalculia with preserved approximation. *Neuropsychologia* 1991;29:1045–74.
- 36 Ferro JM, Botelho MA. Alexia for arithmetical signs: a cause of disturbed calculation. *Cortex* 1980;16:175–80.
- 37 Ojemann GA. Mental arithmetic during human thalamic stimulation. *Neuropsychologia* 1974;12:1–10.
- 38 Lindqvist T. Nouvelles études sur le problème de l'acalculie. *Acta Med Scand* 1936;88:217–77.
- 39 Cipolotti L, Butterworth B, Denes G. A specific deficit for numbers in a case of dense acalculia. *Brain* 1991;114:2619–37.
- 40 McCloskey M, Caramazza A, Basili A. Cognitive mechanisms in number processing and calculation: evidence from dyscalculia. *Brain Cogn* 1985;4:171–96.
- 41 McCloskey M, Caramazza A. Cognitive mechanisms in normal and impaired number processing. In: Deloche G, Seron X, eds. *Mathematical Disabilities: a Cognitive Neuropsychological Perspective*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates; 1987. p. 201–19.
- 42 McCloskey M, Caramazza A. Dissociation of calculation processes. In: Deloche G, Seron X, eds. *Mathematical Disabilities: a Cognitive Neuropsychological Perspective*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates; 1987. p. 221–34.
- 43 Deloche G, Seron X. Numerical encoding: a general production model. In: Deloche G, Seron X, eds. *Mathematical Disabilities: a Cognitive Neuropsychological Perspective*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates; 1987. p. 137–70.
- 44 Deloche G, Seron X. From one to 1: an analysis of a transcoding process by means of neuropsychological data. *Cognition* 1982;12:119–49.
- 45 Seron X, Deloche G. Les troubles du calcul et du traitement des nombres. In: Seron X, Jeannerod M, eds. *Neuropsychologie Humaine*. Liège: Mardaga; 1994. p. 439–51.
- 46 Clark JM, Campbell JID. Integrated versus modular theories of number skills and acalculia. *Brain Cogn* 1991;17:204–39.
- 47 Cipolotti L, Warrington EK, Butterworth B. Selective impairment in manipulating arabic numerals. *Cortex* 1995;31:73–86.
- 48 Brysbaert M. Arabic number reading: on the nature of the numerical scale and the origin of phonological recoding. *J Exp Psychol* 1995;124:434–52.
- 49 Shallice T. Selective impairments of knowledge. In: Shallice T, ed. *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge: Cambridge University Press; 1988. p. 269–306.
- 50 Kahn HJ, Whitaker HA. Acalculia: a historical review of localization. *Brain Cogn* 1991;17:102–15.

-
- 51 Pontius AA. Finger misinterpretation and dyscalculia in an ecological context: toward an ecological (cultural) evolutionary neuropsychiatry. *Percept Mot Skills* 1983;57:1191–208.
-
- 52 Abts H, Crols R, Marien P, Saerens J, Holvoet J, de Deyn P. Paroxysmic neuropsychological symptoms as the early expression of hepatic encephalopathy: a case report. *Acta Neurol* 1993;15:268–76.
-
- 53 Sveinbjornsdottir S, Duncan JS. Parietal and occipital lobe epilepsy: a review. *Epilepsia* 1993;34:493–521.
-
- 54 Moscovitch M, Umiltà C. Modularity and neuropsychology. In: Schwartz MF, ed. *Modular deficits in Alzheimer-type dementia*. Cambridge: Bradford Book; 1990. p. 1–59.
-
- 55 Calvin WH. *The Cerebral Code: Thinking a Thought in a Mosaics of the Mind*. Cambridge, Mass.: The MIT Press; 1996.
-
- 56 Singer W. Temporal coherence as an organizing principle of cortical functions. Conference abstract; 1995.