



"Cerveau et cognition numérique"

Lambert, Ph. ; Pesenti, Mauro

CITE THIS VERSION

Lambert, Ph. ; Pesenti, Mauro. *Cerveau et cognition numérique*. In: *Neurone*, Vol. 26, no.8, p. 35-40 (2021)
<http://hdl.handle.net/2078.1/254153>

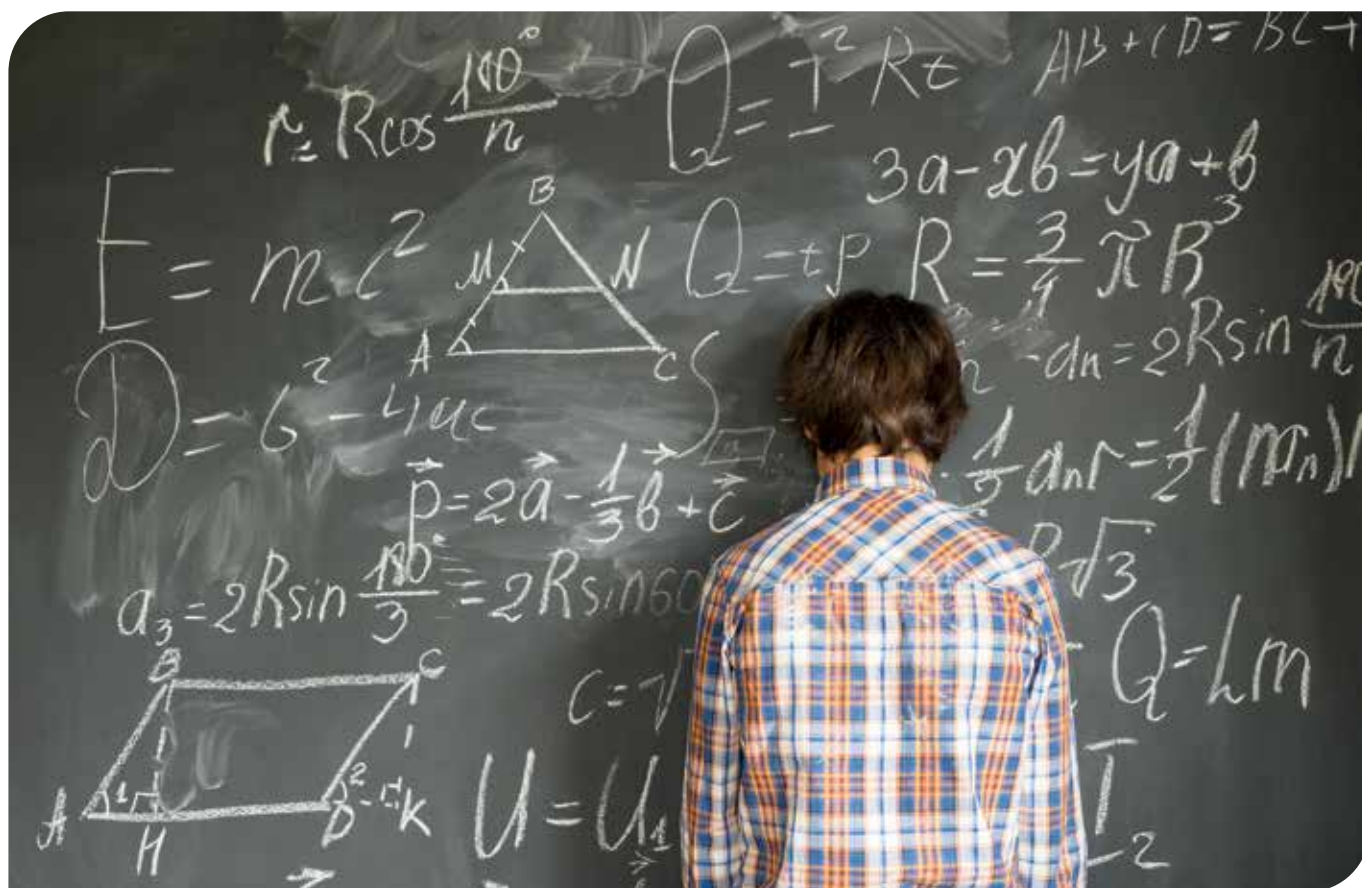
Le dépôt institutionnel DIAL est destiné au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques émanant des membres de l'UCLouvain. Toute utilisation de ce document à des fins lucratives ou commerciales est strictement interdite. L'utilisateur s'engage à respecter les droits d'auteur liés à ce document, principalement le droit à l'intégrité de l'œuvre et le droit à la paternité. La politique complète de copyright est disponible sur la page [Copyright policy](#)

DIAL is an institutional repository for the deposit and dissemination of scientific documents from UCLouvain members. Usage of this document for profit or commercial purposes is strictly prohibited. User agrees to respect copyright about this document, mainly text integrity and source mention. Full content of copyright policy is available at [Copyright policy](#)



Le fonctionnement cérébral repose sur une organisation en réseaux composés d'unités indépendantes en interaction. La sphère de nos compétences numériques et arithmétiques n'échappe pas à la règle, ainsi qu'ont pu le montrer les études centrées sur la représentation sémantique des nombres, le «transcodage», les «faits arithmétiques» ou encore les calculs complexes. Cette modularité explique notamment l'existence de nombreuses dissociations observées chez les patients acalculiques.

CERVEAU ET COGNITION NUMÉRIQUE



Philippe Lambert

Introduction

Au début du 19^e siècle, le médecin et anatomiste allemand Franz Josef Gall et son collaborateur Johann Gaspar Spurzheim, physiologiste, postulent que le crâne reproduit fidèlement la surface du cortex; de la sorte, ils posent les jalons de la phrénologie ou crânioscopie. Ils considèrent que chaque fonction met en jeu une structure cérébrale spécifique dont le volume est d'autant plus important que la faculté correspondante est développée. Aussi, selon eux, l'efficacité particulière dont peut faire montre un individu dans une fonction cognitive donnée est-elle directement palpable, puisqu'elle entraîne une excroissance à un endroit déterminé du crâne. D'où, d'ailleurs, l'expression familière «avoir la bosse des maths».

À partir de crânes de criminels et de malades mentaux, ainsi que de bustes d'hommes politiques, Gall et Spurzheim élaborent un modèle dans lequel ils assignent à 27 facultés mentales une localisation précise sur le cortex cérébral. Très vite cependant, la phrénologie se trouve au centre de vives polémiques. Les milieux scientifiques lui reprochent la légèreté de ses observations, et l'Église, son matérialisme, qui jure avec le spiritualisme auquel elle semble ne vouloir tolérer aucune entorse. En cela, elle oublie que pour les pères de l'Église primitive – en particulier Némésius, évêque d'Émèse, et saint Augustin –, les fonctions cérébrales étaient en correspondance avec des régions discrètes du cerveau. Ainsi, ils considéraient que les ventricules antérieur, moyen et postérieur étaient les supports respectifs de l'imagination, de la raison et de la mémoire.

fonctions de l'esprit peuvent être fragmentées et, partant, reposer sur des substrats organiques spécifiques, bien que parfois très diffus. Par exemple, tel patient cérébrolése ne saisit plus le langage oral, mais continue à comprendre le langage écrit, alors que chez tel autre, c'est le phénomène inverse qui est observé. Tel autre patient encore parvient à réaliser aisément des soustractions, bien qu'il ne soit plus à même d'additionner deux nombres...

C'est dans cette logique de réseaux constitués d'unités indépendantes en interaction que sont explorées nos habiletés numériques et arithmétiques. D'où cette question: prises isolément, ces dernières dépendent-elles de structures cérébrales spécifiques? Est-ce le cas de notre capacité à saisir la signification des nombres arabes, par exemple.

C'est dans cette logique de réseaux constitués d'unités indépendantes en interaction que sont explorées nos habiletés numériques et arithmétiques.

Aujourd'hui, la phrénologie est une discipline surannée, une curiosité historique. Et l'époque n'est plus à localiser des «mégafunctions», tels le langage ou la mémoire, en un site parfaitement circonscrit. Contrairement aux théories localisationnistes classiques, qui ont longtemps tenu le haut du pavé, les travaux des neurosciences cognitives, les modèles de psychologie cognitive et l'imagerie cérébrale fonctionnelle mettent désormais l'accent sur une organisation cérébrale en réseaux, dont chacun serait constitué d'unités indépendantes en interaction. La pathologie offre de nombreux exemples qui illustrent à quel point les

Ou de celle d'effectuer mentalement une multiplication? Ou d'évaluer le temps qui passe... Dans la foulée transparaissent des interrogations en cascade. Ainsi, la prise de conscience de la réalité d'un nombre suppose-t-elle des processus mentaux différents selon la notation dans laquelle il est écrit (lettres, chiffres arabes, chiffres romains, suite de points, etc.)? Autre illustration: en admettant que le calcul constitue une fonction mentale indépendante, l'addition, la soustraction, la multiplication et la division s'appuient-elles sur des structures cérébrales distinctes?

Compétences numériques primitives

À la suite d'une série d'études et d'observations publiées en 1941 dans leur ouvrage *La genèse du nombre chez l'enfant*, le célèbre psychologue suisse Jean Piaget et sa consœur polonaise Alina Szeminska ont considéré que le concept du nombre n'était pas construit chez l'enfant avant l'âge de 6 ou 7 ans. Quelques années plus tard, le psychologue français Jacques Mehler et son homologue américain Thomas Bever montrèrent qu'il n'en était rien. Leurs travaux mirent en évidence que dès l'âge de 2 ans, des enfants sont à même de dédaigner une rangée de bonbons étirée au profit d'une autre plus courte, mais mieux fournie. Bref, les jeunes enfants ont conscience de la numérosité, c'est-à-dire du nombre d'éléments constitutifs d'une collection d'objets.

Mieux encore, il est acquis maintenant que le nourrisson dispose de compétences numériques rudimentaires. Dans une expérience déjà ancienne, des diapositives étaient présentées à des nouveau-nés; sur chacune d'elles, un nombre limité d'objets: 2, par exemple. Soudain, un cliché ne renfermant qu'un objet ou, au contraire, en comptant 3 est projeté sur l'écran. L'enfant perçoit-il la différence? Oui, il manifeste sa sensibilité au contraste par une plus grande qualité d'éveil, comme en témoignent l'accélération de son rythme de succion ou l'allongement de son temps de fixation oculaire. Le phénomène a même été observé chez des enfants d'une semaine à peine. D'après d'autres travaux (1), un enfant de 5 mois serait capable d'anticiper le résultat d'opérations d'addition et de soustraction simples de type $1 + 1$ ou $2 - 1$.

Si le bébé humain possède des compétences précoces tant pour détecter des variations de numérosités que pour

anticiper le résultat des additions et soustractions les plus élémentaires, il n'est pas le seul: il partage ce privilège avec des espèces animales. «*On a longtemps cru que, chez l'animal, ces aptitudes étaient l'apanage des primates, mais l'on s'est rendu compte que la plupart des mammifères étaient capables de traiter la numérisité. Par ailleurs, des travaux récents indiquent que*



Professeur Mauro Pesenti
Maître de recherches
du FNRS à l'Institut de
recherche en sciences
psychologiques de
l'Université catholique
de Louvain (UCLouvain)

des espèces telles que les pigeons (2), les très jeunes poussins (3), les poissons (4) et les abeilles (5) manifestent non seulement une sensibilité à la numérosité, mais aussi des compétences numériques, voire arithmétiques», rapporte le professeur Mauro Pesenti, maître de recherches du FNRS à l'Institut de recherche en sciences psychologiques de l'Université catholique de Louvain (UCLouvain). Et d'ajouter que moyennant un long apprentissage, certains primates deviennent aptes à apprendre des notations symboliques. Par exemple, des singes finissent par comprendre la signification de chiffres arabes et par en dériver des propriétés arithmétiques (6) qu'on ne leur a pas apprises explicitement.

L'idée défendue par Stanislas Dehaene, du Collège de France, et par les Américains Rochel Gelman et Randy Gallistel est que l'être humain et d'autres espèces disposeraient de compétences numériques primitives ayant contribué à leur survie. Existait en effet une nécessité d'optimisation des choix et des comportements dans la quête de nourriture (distinguer les sources les plus abondantes) et face au risque encouru en présence de prédateurs selon leur nombre. Il ne fait guère de doute qu'une partie de nos habiletés numériques et arithmétiques ressortissent à notre

bagage biologique. Mais sont-elles innées pour autant? Nombre de chercheurs le postulent. Mauro Pesenti, lui, n'en est pas persuadé: «*Durant sa vie intra-utérine, le fœtus est exposé à des vibrations qu'il ressent ou entend – les battements du cœur de sa mère, notamment. Selon leur nature, elles se manifestent avec une certaine fréquence. Bien que*

l'hypothèse de l'innéité puisse être la bonne, il est également envisageable que ce que le fœtus expérimente participe à une certaine forme d'appréhension de la numérosité.»

Le langage des nombre se confond-il avec celui des mots? Autrement dit, les significations numériques ne sont-elles qu'un sous-ensemble des significations langagières ou, au contraire, bénéficient-elles d'un statut particulier, d'une autonomie, à l'intérieur du système sémantique? Anatomiquement, les zones cérébrales de la sémantique numérique (cortex pariétal) ne sont pas incluses dans celles de la sémantique langagière en général (cortex temporal). Par ailleurs, diverses observations réalisées chez des patients cérébrolésés montrent que si les compétences langagières et les compétences numériques sont souvent atteintes simultanément, chacune d'elles peut l'être de façon sélective.

La rencontre entre un dispositif protonumérique relativement élémentaire et les aptitudes langagières et logiques propres à notre espèce différencie l'homme de l'animal dans la sphère de la cognition numérique.

Représentation sémantique

La rencontre entre un dispositif protonumérique relativement élémentaire et les aptitudes langagières et logiques propres à notre espèce différencie l'homme de l'animal dans la sphère de la cognition numérique. Là se situe vraisemblablement l'origine du développement considérable des compétences de l'être humain dans ce domaine. «*Les capacités de l'animal se limitent à de petites numérosités (7 ou 8),* dit le professeur Pesenti. *Au-delà, ses performances se dégradent et relèvent de l'approximation. Grâce aux systèmes de notations numériques, l'homme peut représenter les numérosités avec une très grande précision et les soumettre à un ensemble complexe de transformations arithmétiques.»*

À la fin des années 1990, le professeur Xavier Seron, ancien président de la Société de neuropsychologie de langue française, membre de l'Académie royale de Belgique, avait notamment étudié le cas d'un patient cérébrolésé affecté d'un trouble sévère du langage en production verbale (7). À la suite d'un traumatisme crânien, cet homme de niveau socioculturel élevé était devenu incapable de prononcer plus de 300 mots différents. Pis: quand on lui soumettait des images d'objets appartenant à diverses catégories sémantiques, il n'arrivait à en dénommer aucun. En revanche, il n'éprouvait pas la moindre difficulté dès que les images représentaient des nombres. De même, si les chercheurs demandaient au patient de citer à voix haute autant de nombres que possible en un laps de temps

déterminé, ses performances étaient absolument normales, alors qu'elles s'effondraient dès que l'exercice portait sur des noms de pays ou de moyens de transport. En d'autres termes, la représentation sémantique des nombres et le lexique des mots de nombres étaient sélectivement préservés, alors que la représentation sémantique et l'accès au lexique des mots de la langue se trouvaient sélectivement perturbés. «*Les études de cas, les modèles cognitifs développés à partir des années 1980 et la neuro-imagerie fonctionnelle indiquent que les nombres constituent un domaine sémantique et lexical spécifique mettant en jeu des structures cérébrales particulières, souligne Mario Pesenti. Évidemment, il existe des mécanismes communs au langage des mots et à celui des nombres, comme la mise à contribution de la mémoire de travail ou des ressources attentionnelles. C'est l'atteinte de certains de ces mécanismes partagés qui explique pourquoi compétences numériques et langagières sont quelquefois déficitaires simultanément.*»

Au niveau neuro-anatomique, il est établi aujourd'hui que le traitement de la signification quantitative des nombres ainsi que le traitement des magnitudes non numériques – telles la longueur, l'intensité, la durée, etc. – recrutent les aires situées autour du sillon intrapariétal (SIP) gauche et droit, principalement le segment horizontal de ce sillon. Le traitement de la numérosité, lui, fait essentiellement appel aux aires du SIP droit et à des aires frontales droites.

Erreurs de transcodage

Une autre question cruciale est celle du transcodage. En effet, comment s'opère la conversion d'une notation présentée en entrée (chiffres arabes, par exemple) en une autre produite en sortie (lettres, sons de la langue...)? «*Cette question présente un intérêt important sur le plan clinique,*

car elle est au cœur de nombreuses plaintes de patients», commente le professeur Pesenti. Comme l'ont mis en évidence les études scientifiques, en particulier celles de Xavier Seron à l'UCLouvain relatives au passage du code arabe au code verbal, les opérations mentales nécessaires à ce type de conversion sont complexes et, une fois encore, impliquent des soubassements cérébraux spécifiques.

Chez les patients cérébrolésés, on observe deux types d'erreurs de transcodage, les unes de nature lexicale, les autres de nature syntaxique.

Chez les patients cérébrolésés, on observe deux types d'erreurs de transcodage, les unes de nature lexicale, les autres de nature syntaxique. Les premières sont elles-mêmes de deux types. Il arrive que les patients transcodent septante en 50, treize en 14 ou cinq cent vingt-cinq en 524, mais aussi trente en 3, quatorze en 40 ou 60 en seize. Les erreurs du premier type se situent à l'intérieur d'une même classe lexicale, une dizaine étant remplacée par une autre dizaine, une unité par une autre unité, etc. Par contre, dans les erreurs du deuxième type, le patient se trompe toujours de classe, mais respecte la position que l'élément occupait dans sa classe originelle. Ainsi, trente et 3 ont en commun d'être le troisième élément dans leur classe respective. Selon la lésion cérébrale, le déficit fonctionnel touchera tantôt le mécanisme d'identification de la classe, tantôt le mécanisme d'identification de la position, tantôt les deux.

Et les erreurs syntaxiques? Elles se traduisent par le fait qu'à partir d'éléments lexicaux pourtant rigoureusement

corrects, la structure produite par le sujet s'avère incorrecte. Par exemple, il est classique qu'un patient puisse écrire 2100405 (2/100/40/5) au départ de deux cent quarante-cinq. Il transcrit alors en notation arabe l'équivalent de chaque nom de nombre, mais en négligeant l'intégration syntaxique.

Erreurs lexicales et syntaxiques ne cohabitent pas nécessairement et, au sein des premières, existent également des dissociations. Les mécanismes lexicaux et syntaxiques intervenant dans le traitement des nombres seraient donc indépendants, et une partition se présenterait même au sein des premiers.

Faits arithmétiques et calculs complexes

À côté des recherches sur les problématiques de la représentation des nombres et de la manipulation des notations, divers travaux concernent le calcul proprement dit. Dans ce contexte, de nombreuses études ont été consacrées à ce que les psychologues appellent les «faits arithmétiques». De quoi s'agit-il? Des résultats d'opérations de base (additions, soustractions, multiplications, divisions) que nous avons appris généralement par cœur durant l'enfance, stockés en mémoire à long terme et qui nous viennent instantanément à l'esprit sans que nous ayons à effectuer un calcul réel. Par exemple, la solution de la multiplication de 3 par 2 ou de l'addition de 4 et 2 revêt un caractère automatique

chez la plupart d'entre nous. «*On considère généralement que les faits arithmétiques sont stockés dans la mémoire sémantique, mais la nature de ce stockage reste l'objet de débats*», indique Mauro Pesenti.

Certains auteurs se réfèrent à un format de stockage abstrait (*), d'autres à un format de stockage qui serait lié à l'une ou l'autre modalité sensorielle en fonction des préférences de chaque individu. D'autres encore, dont en particulier Stanislas Dehaene et Laurent Cohen, de l'Institut du Cerveau et de la Moelle épinière (Paris), postulent que les faits arithmétiques sont codés sous forme d'associations verbales, comme c'est le cas des prières ou des récitations, par exemple. En conséquence, la récupération des faits arithmétiques engagerait des régions cérébrales impliquées dans le langage (gyrus frontal inférieur et gyrus temporal supérieur) et la mémoire de travail verbale (gyrus angulaire dans le lobe pariétal inférieur). «*Les données de la littérature suggèrent que la conception de Dehaene et Cohen pourrait se vérifier chez certaines personnes, mais pas chez d'autres*», dit le professeur Pesenti. De fait, lors de la récupération de faits arithmétiques, les aires du langage ne sont pas systématiquement observées en imagerie

cérébrale chez des individus tout-venant (8). De surcroît, certains patients ont des performances arithmétiques parfaitement préservées, alors qu'ils présentent des altérations massives de leurs habiletés langagières (9) (Figure 1).

Selon les données de neuro-imagerie, les régions du cerveau impliquées dans les problèmes arithmétiques simples (faits arithmétiques) sont les aires situées autour du SIP et des aires pré-motrices du cortex frontal qui correspondent au réseau sous-tendant le contrôle du mouvement des doigts, ce qui, indique Mauro Pesenti, pourrait constituer une trace de procédures ancestrales de résolution reposant sur le comptage des doigts. Dans une contribution à l'*Encyclopédia Universalis*, le psychologue écrivait par ailleurs: «*La résolution de problèmes arithmétiques simples s'accompagne en outre parfois d'activations dans le gyrus angulaire et dans les gyri temporaux moyens et supérieurs, ainsi que dans la partie postérieure du lobule pariétal supérieur, suggérant à la fois une implication de processus langagiers et de processus attentionnels liés à l'exploration de représentations numériques de nature spatiale dans la récupération des réponses en mémoire.*»

Le calcul mental complexe, c'est-à-dire impliquant des nombres à plusieurs chiffres, recrute des réseaux plus étendus, deux a priori. Le premier est constitué d'aires associées à la mémoire de travail visuo-spatiale dans les cortex pariétaux et frontaux. Le second, d'aires associées à l'imagerie mentale visuelle, à la jonction occipito-temporale. «*Toutefois, la prudence s'impose, dans la mesure où l'on observe des différences interindividuelles dans les stratégies de résolution de calculs complexes. On peut très bien concevoir des variations dans les réseaux liées, par exemple, à une utilisation de la mémoire de travail verbale plutôt que de la mémoire de travail visuo-spatiale*», précise le professeur Pesenti (Figure 2).

Mémoire de travail à long terme

Les calculateurs prodiges ont retenu l'attention des chercheurs. Ils tireraient profit de la conjonction de deux éléments: tout d'abord, avoir engrangé de nombreux faits arithmétiques en mémoire; ensuite, avoir développé des procédures d'une rare efficacité. Mais quelles procédures? L'équipe de Mauro Pesenti a étudié le cas d'un calculateur prodige nommé Rüdiger Gamm, au moyen de la tomographie par émission de positons. Il apparut que, dans la résolution mentale de calculs complexes, cet expert activait les mêmes régions

Figure 1: Les aires cérébrales habituellement observées lors de la récupération en mémoire de faits arithmétiques.



Hémisphère gauche

Hémisphère droit

Cette figure représente les aires cérébrales habituellement observées lors de la récupération en mémoire de faits arithmétiques: les aires entourant les parties horizontales des sillons intrapariétaux gauche et droit [rouge] liées aux traitements sémantiques et la manipulation des quantités numériques, les aires frontales inférieures et pariétales gauches [bleu] et temporales supérieures bilatéralement [vert] qui sous-tendent d'éventuelles stratégies verbales. Source: Mauro Pesenti

Figure 2: Les aires cérébrales habituellement observées lors de la résolution de problèmes arithmétiques avec des nombres à deux chiffres.



Hémisphère gauche

Hémisphère droit

Cette figure représente les aires cérébrales habituellement observées lors de la résolution de problèmes arithmétiques avec des nombres à deux chiffres: les aires pariétales et frontales bilatéralement [rouge] liées à la mémoire de travail visuo-spatiale, les aires frontales inférieures gauches [bleu] liées au maintien d'information en mémoire de travail (possiblement verbale), et occipito-temporales bilatéralement [vert] qui sous-tendent l'imagerie mentale visuelle. Source: Mauro Pesenti

cérébrales que les sujets non experts mais, en sus, avait notamment recours à des structures temporales médianes droites (région hippocampique et parahippocampique) dont on connaît l'implication dans les aspects visuo-spatiaux de la mémoire épisodique (long terme), celle des événements personnellement vécus. En l'occurrence, il est établi que la région parahippocampique droite s'acquitte du stockage et du maintien à long terme des souvenirs épisodiques de nature visuo-spatiale. Étaient également sollicitées les aires frontales médianes droites, qui sous-tendent les mécanismes de récupération en mémoire épisodique.

«En calcul mental comme dans d'autres domaines de la cognition, la faible capacité de la mémoire de travail constitue une limitation, explique Mauro Pesenti. Notre hypothèse est que les calculateurs prodiges, du moins celui que nous avons étudié, utilisent la mémoire épisodique, de capacité très supérieure, pour soutenir le calcul mental. Raison pour laquelle il nous semble fondé de parler d'une 'mémoire de travail à long terme' recrutant les mêmes aires cérébrales que celles sous-tendant la mémoire épisodique.»

Deux modèles, trois modules

Trouble cognitif acquis à la suite d'une atteinte cérébrale, tel qu'un traumatisme crânien, un accident vasculaire cérébral, une tumeur ou encore une maladie neurodégénérative, l'acalculie est caractérisée par un déficit relatif au traitement des nombres, à la réalisation de calculs ou aux deux. On estime qu'environ 60% des patients victimes d'une lésion de l'hémisphère gauche sont en proie à des problèmes d'acalculie et quelque 15% quand la lésion touche l'hémisphère droit. Les déficits les plus sévères découlent généralement de lésions localisées dans l'hémisphère gauche au niveau des aires juxtantes le sillon

intrapariétal, le gyrus angulaire, les aires occipitales ou temporales.

Dans la pratique clinique, les trois plaintes le plus fréquemment rapportées par les patients sont, en ordre décroissant, les problèmes de transcodage (passer d'une notation numérique à une autre), les problèmes de calcul mental et les problèmes de calcul écrit, y compris l'identification des opérateurs (+, -, x, :). «Sur le plan diagnostique, la démarche consiste à identifier chez chaque patient quelles sont la ou les capacités atteintes et les capacités préservées, ces dernières pouvant être exploitées éventuellement pour contribuer à pallier les déficiences», dit le professeur Pesenti.

Avec l'émergence des modèles cognitifs dans les années 1980, une attention particulière s'est précisément portée sur les dissociations présentes chez les patients acalculiques. Deux modèles occupent actuellement le devant de la scène: le «modèle modulaire», élaboré par Michael McCloskey, de l'Université Johns Hopkins, et le «modèle du triple code» de Stanislas Dehaene. Comme le relate Mauro Pesenti, tous deux sont composés de trois modules: le premier voué à la compréhension des nombres, le second à leur production et le troisième au calcul. Dans le modèle de McCloskey, ces trois composantes reposent sur des représentations sémantiques des nombres de nature abstraite, ne possédant donc aucune propriété visuelle, verbale, motrice ou kinesthésique. «La force de ce modèle est de rendre compte des dissociations chez les patients cérébrolésés, de préciser dans quel domaine des traitements numériques ou du calcul, voire des deux, se situent leurs déficits. Il reste le modèle de référence dans la pratique clinique», commente le professeur Pesenti.

En plus de proposer une implantation anatomique pour les fonctions mises en jeu, le modèle de Dehaene (10), lui, se distingue de celui de son homologue américain par le fait que les représentations y sont de natures différentes selon les tâches particulières à accomplir et les régions cérébrales respectives qui sous-tendent leur réalisation. Elles sont en outre interconnectées. C'est ainsi, nous l'avons évoqué, que pour Dehaene, la résolution des faits arithmétiques est en lien avec une représentation de type verbal. Dans d'autres cas, la représentation pourrait être soit visuelle, soit analogique – une quantité donnée est alors représentée sur un continuum, une «ligne numérique mentale» suggérant l'échelonnement des nombres sur une règle, par exemple.

Quant à la meilleure formule de prise en charge des patients acalculiques, elle semble devoir s'appuyer sur deux piliers: d'une part, un entraînement intensif à base d'exercices répétitifs et, d'autre part, un réapprentissage de type conceptuel. Par exemple, en réexpliquant et en montrant visuellement qu'une multiplication est équivalente à des additions répétées (11).

(*) En sciences cognitives, les représentations abstraites ou «amodales» représentent les concepts et les relations qui les unissent sous une forme indépendante d'une quelconque modalité sensorielle.

Referentien

1. Wynn K. Addition and subtraction by human infants. *Nature* 1992;358(27):749-50.
2. Scarf D, Hayne H, Colombo M, et al. Pigeons on par with primates in numerical competence. *Science* 2011;334(6063):1664.
3. Rugani R, Fontanari L, Simoni E, Regolin L, Vallortigara G. Arithmetic in newborn chicks. *Proc Biol Soc* 2009;276:2451-60.
4. Agrillo C, Dadda M, Serena G, Bisazza A. Do fish count? Spontaneous discrimination of quantity in female mosquitofish. *Animal Cognition* 2005;11(3):495-503.
5. Pahl M, Si A, Zhang S. Numerical cognition in bees and other insects. *Front Psychol* 2013;4, article 162.
6. Boysen ST, Berntson GG. Numerical competence in a Chimpanzee (*Pan troglodytes*). *J Comp Psychol* 1989;103(1):23-31.
7. Thioux M, Pillon A, Samson D, de Partz M-P, Noël M-P, Seron X. The isolation of numerals at the semantic level. *Neurocase* 1998;4:371-89.
8. Pesenti M, Thioux M, Seron X, De Volder A. Neuroanatomical substrate of Arabic number processing, numerical comparison and simple addition: A PET study. *J Cogn Neurosci* 2000;12(3):461-79.
9. Whalen J, McCloskey M, Lindemann M, Bouton G. Representing arithmetic table facts in memory: Evidence from acquired impairments. *Cogn Neuropsychol* 2002;19:505-22.
10. Dehaene S. Varieties of numerical abilities. *Cognition* 1992;44:1-42.
11. Domahs F, Barthel-Doering L, Delazer M. Rehabilitation of arithmetic abilities: Different intervention strategies for multiplication. *Brain and Language* 2003;87:165-6.