

2001

I

PERSPECTIVES
SUR LES MATHÉMATIQUES ACTUELLES

Les bases cérébrales de l'intuition numérique

par STANISLAS DEHAENE

Le cerveau des mathématiciens fascine. Par quels mécanismes un tissu de neurones et de synapses, un imbroglio de neurotransmetteurs peuvent-ils « transformer du café en théorèmes » ? Quelles représentations mentales et quelles architectures neuronales donnent au cerveau humain — et à lui seul — accès aux vérités des mathématiques ? Périodiquement, certains affirment avoir trouvé la réponse dans le cerveau du plus mythique des savants du xx^e siècle, Albert Einstein. De son vivant déjà, le grand physicien était sollicité pour toutes sortes d'expérimentations qui suscitaient les commentaires amusés de Roland Barthes : « Une image le montre étendu, la tête hérissée de fils électriques : on enregistre les ondes de son cerveau, cependant qu'on lui demande de "penser à la relativité". » Plus tard, le précieux encéphale sera préservé, photographié, étiqueté, découpé, perdu et retrouvé. Il ressort périodiquement de son bocal pour de nouvelles révélations. En 1985, Marian Diamond, de l'université de Californie à Berkeley, rapporte une densité plus élevée de cellules gliales, qui constituent l'environnement des neurones corticaux, dans une région pariétale du cortex d'Einstein. En 1999, Sandra Witelson, de l'université McMaster dans l'Ontario, affirme avoir identifié, plus de quarante ans après la mort du physicien, une anomalie macroscopique de son anatomie cérébrale : ses lobes pariétaux seraient enflés, et leurs sillons se seraient si profondément détournés de leur tracé normal qu'une région corticale entière, l'opercule pariétal, en serait absente.

Je fais partie de ceux, nombreux, qui estiment anecdotiques et prématurées ces recherches qui prétendent trouver l'origine du génie dans quelques centimètres cubes de cortex supplémentaire. Malgré

leurs avancées spectaculaires, les neurosciences cognitives ne sont pas prêtes à analyser le substrat neural de variations individuelles aussi subtiles que celles qui distinguent un prix Nobel d'un physicien de moindre envergure. Il leur revient de plein droit, par contre, de commencer à explorer ce qu'il y a de commun à tous les cerveaux capables de mathématiques. En dernière analyse, comme l'affirme Jean-Pierre Changeux dans son dialogue avec le mathématicien contemporain Alain Connes*, « les objets mathématiques s'identifient à des états physiques de notre cerveau, de telle sorte qu'on devrait en principe pouvoir les observer de manière extérieure grâce à des méthodes d'imagerie cérébrale ». De fait, les nouvelles méthodes des sciences cognitives et de l'imagerie par résonance magnétique permettent aujourd'hui d'aborder empiriquement la représentation cérébrale des plus simples des objets mathématiques, ceux qui sont partagés par l'ensemble de l'humanité : les petits nombres entiers.

Focalisés sur les abstractions des mathématiques les plus récentes, quelques mathématiciens pourront ne voir là que des travaux d'intérêt périphérique sur des objets trop simples qui ne font pas ou plus partie du champ de la recherche mathématique. Ce serait oublier, cependant, que les nombres font partie des briques de base sans lesquelles l'édifice des mathématiques n'aurait jamais pu s'élever. La question des fondements de l'arithmétique occupe une place centrale en philosophie des mathématiques, depuis Platon et Descartes jusqu'à Bertrand Russell ou David Hilbert. Nos recherches suggèrent qu'un des fondements de l'arithmétique, l'intuition du concept de nombre, trouve son origine dans l'architecture de notre cerveau qui représente spontanément, vraisemblablement dès la naissance, ce paramètre essentiel du monde physique.

Les bases cérébrales de l'intuition numérique

Comment cerner l'intuition numérique en laboratoire ? Considérons un exemple très simple : l'addition des petits nombres. L'addition $43 + 39 = 51$ est-elle juste ? Un coup d'œil suffit pour répondre que non. Sans avoir à faire le calcul, nous reconnaissons que le résultat proposé est manifestement faux. Nous utilisons spontanément une métaphore spatiale : le résultat proposé, 51, est trop « distant », peut-être même « trop à gauche ». Cette opération mentale d'approximation et de comparaison se déroule hors de notre introspection : nous savons que le résultat est trop petit, mais nous ne savons guère comment nous savons que nous le savons. Voilà

* Connes (A.), Changeux (J.-P.), *Matière à pensée*, Odile Jacob, 1989 « Poches Odile Jacob », 2000.

caractérisée, en quelques phrases, cette intuition arithmétique que nous possédons tous. Il s'agit d'une sorte de carte spatiale, de « ligne numérique » sur laquelle nous posons mentalement les quantités et qui nous permet immédiatement de repérer les relations de proximité entre nombres, en sorte que nous savons immédiatement, mais de façon imprécise, quelle place tel nombre occupe relativement à d'autres.

La simplicité de ce sens du nombre est trompeuse. En effet, en dépit de son minimalisme, notre intuition numérique partage avec l'introspection des grands mathématiciens au moins deux traits fondamentaux. Tout d'abord, la pensée mathématique de haut niveau s'élabore souvent sans le support du langage. « Les mots et le langage, écrits ou parlés, ne semblent pas jouer le moindre rôle dans le mécanisme de ma pensée », affirme Einstein. De même l'intuition numérique ne fait appel ni aux mots, ni aux aires corticales du langage, mais dépend des régions pariétales associées à la perception de l'espace. En second lieu, la découverte mathématique repose sur des mécanismes inconscients. « Ce qui frappe », dit Poincaré, « ce sont les apparences d'illumination subite, signes manifestes d'un long travail inconscient ; le rôle de ce travail inconscient dans l'invention mathématique me paraît incontestable. » En ce qui concerne l'intuition du nombre, cette introspection fréquente chez les mathématiciens peut être confirmée rigoureusement par les méthodes de la psychologie expérimentale, qui démontrent l'existence de calculs subliminaux.

Le caractère non linguistique de l'intuition des nombres apparaît clairement chez les personnes bilingues. Il faut cependant distinguer clairement le calcul exact de l'intuition des quantités. Le calcul exact dépend des circuits du langage. Tous ceux qui maîtrisent bien une seconde langue peuvent en faire l'expérience : même après des années, il est extrêmement difficile de faire des calculs mentaux dans une langue autre que celle dans laquelle nous avons appris l'arithmétique. Je connais un collègue italien qu'un séjour de plus de vingt ans aux États-Unis a transformé en bilingue presque parfait. Il parle et écrit en anglais dans une syntaxe rigoureuse et avec un vocabulaire étendu. Pourtant, dès qu'il doit faire un petit calcul, on l'entend marmonner les nombres dans son italien natal. Il ne parvient toujours pas à calculer avec fluidité en anglais. Cette anecdote révèle à quel point la mémoire « exacte » de l'arithmétique dépend du langage. Mais qu'en est-il de la faculté d'approximation intuitive ?

Dans une étude comportementale conduite par Elizabeth Spelke au Massachusetts Institute of Technology, des sujets parlant couramment le russe et l'anglais étaient entraînés, dans l'une de leurs deux langues, à résoudre une série de problèmes d'addition. Certains problèmes requéraient une réponse exacte, et ne pouvaient donc pas être résolus par la seule intuition. Les autres ne nécessitaient que l'évaluation d'un ordre de grandeur. Après entraînement dans une langue donnée, on examinait ensuite la capacité des

sujets à résoudre les mêmes problèmes posés dans l'autre langue. Au bout de quelques séances, tous les sujets donnaient plus vite la bonne réponse aux problèmes qui demandaient une réponse exacte lorsque la question leur était posée dans la langue utilisée au cours de l'entraînement, que lorsqu'elle était posée dans l'autre langue. Cela confirmait que ces connaissances exactes sont stockées dans le cerveau dans un format linguistique spécifique à une langue donnée. Cependant, les problèmes approximatifs se comportaient différemment : les performances étaient équivalentes dans les deux langues. Une fois mémorisé que $50 + 47$ font environ 100, répondre à la même question dans une autre langue ne pose aucune difficulté supplémentaire.

Nos connaissances sur les quantités approximatives sont donc stockées sous une forme indépendante du langage. Il y a au moins deux circuits cérébraux du calcul mental : un circuit verbal, qui permet de coder les nombres sous forme de mots et de stocker des tables sous formes de phrases apprises par cœur dans une langue donnée ; et un circuit non verbal, où les quantités sont représentées sous une forme spatiale, et qui permet l'approximation.

Grâce à l'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (IRM) du service hospitalier Frédéric-Joliot d'Orsay, nous avons pu visualiser directement quelles aires du cortex cérébral contribuent à ces deux circuits. L'IRM permet de voir l'entrée en activité des circuits cérébraux dans une tâche cognitive. Toute activation d'un groupe de neurones s'accompagne en effet d'une augmentation locale du débit sanguin dans les capillaires qui entourent cette région. Cette augmentation vient compenser la consommation accrue d'oxygène et de glucose dans le tissu nerveux. L'afflux de sang altère les propriétés magnétiques locales des tissus examinés, et modifie de façon mesurable le signal de résonance magnétique. Celui-ci reflète donc, indirectement, l'état d'activité des populations de neurones du tissu.

Pendant la mesure d'IRM, nous avons demandé à un groupe d'étudiants de résoudre alternativement des problèmes d'approximation (par exemple, $2 + 1$ font-ils environ 4 ou 9 ?) et d'autres qui exigeaient un calcul exact ($2 + 1$ font-ils 3 ou 5 ?). Bien que les sujets aient été soumis aux mêmes problèmes d'addition dans les deux cas, les résultats ont montré que l'adoption d'une stratégie d'approximation ou de calcul exact s'accompagnait de modifications radicales de l'activité cérébrale. Le calcul exact activait un réseau latéralisé dans l'hémisphère gauche et impliquait des aires associées au traitement linguistique de haut niveau (la portion inférieure du cortex frontal gauche et le gyrus angulaire). Au cours de l'approximation, au contraire, l'activité était bilatérale et équivalente dans les deux hémisphères cérébraux. Elle était centrée sur le sillon intrapariétal, une région située hors des aires du langage et associée à la manipulation des objets dans l'espace (Fig. 1). Cette région cérébrale joue un rôle crucial dans l'intuition des nombres.

Elle s'active dès que nous devons réfléchir aux quantités mises en jeu dans un problème d'arithmétique. Bien entendu, elle n'est pas dépositaire de l'ensemble de nos connaissances mathématiques. Il ne s'agit pas d'une « bosse des maths » au sens des phrénologues du XIX^e siècle. Insérée au sein d'un vaste réseau distribué, et en coordination étroite avec les aires associées au traitement des mots et des chiffres, la région pariétale semble contribuer à une fonction restreinte mais cruciale, le positionnement des nombres dans l'espace des quantités.

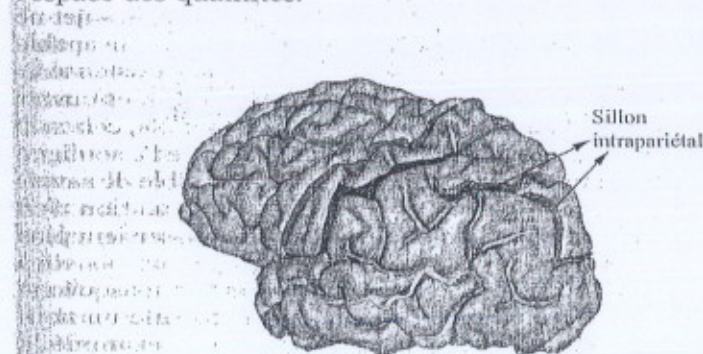


Figure 1 - Localisation du sillon intrapariétal, où l'on observe une intense activité cérébrale lors du calcul mental et du traitement des quantités. Seul l'hémisphère gauche est visible, vu de trois quarts arrière.

Activations cérébrales et lecture subliminale

Récemment, Lionel Naccache et moi-même sommes parvenus à démontrer que la région pariétale peut effectuer ses calculs sans que nous en ayons aucunement conscience, confirmant ainsi les hypothèses de Poincaré et d'Hadamard. Dans le domaine des nombres au moins, l'intuition mathématique se fonde bien sur la possibilité d'un intense travail inconscient.

Notre expérience est simple. Un volontaire est placé face à un écran d'ordinateur. On le prévient que vont s'afficher au centre de l'écran, d'abord un signal composé de lettres aléatoires, puis un nombre. Celui-ci peut être écrit en toutes lettres (SIX) ou en chiffres arabes (6). La personne dispose de deux boutons, l'un à la main droite, l'autre à la main gauche. On l'instruit d'appuyer le plus rapidement possible à droite si le nombre est supérieur à 5, et à gauche s'il est inférieur à 5. Les boutons sont connectés à l'ordinateur, qui mesure à la milliseconde près combien de temps s'écoule entre l'apparition du nombre sur l'écran et la réponse motrice du sujet.

Voilà tout ce que notre volontaire a conscience de faire... mais nous ne lui avons pas tout dit. À son insu, chaque nombre cible est précédé d'un autre nombre totalement invisible, que nous appellerons le nombre amorce. Comment celui-ci est-il rendu invisible ? Nous utilisons une méthode de masquage visuel qui consiste à faire précéder et suivre le mot amorce, que l'on désire effacer de la conscience, par des chaînes de caractères sans signification telles que XHJGKS ou PLMZTA. Lorsque ces lettres sont présentées exactement au même point que le mot amorce, et que la durée de présentation de ce dernier n'excède pas quelques centièmes de secondes, le sujet ne perçoit qu'un clignotement de caractères illisibles. Il est incapable de déchiffrer le mot masqué, ou même d'en percevoir l'existence.

Bien que tous nos volontaires nient ainsi farouchement avoir vu le moindre nombre dans les instants précédant la cible, cela suffit-il à affirmer l'absence de toute conscience ? Comme l'a souligné le philosophe américain Daniel Dennett, il est impossible de savoir si la personne qui nie avoir eu conscience d'une information n'en a effectivement jamais perçu la teneur, ou si elle ne se souvient plus d'en avoir brièvement pris conscience. Toutefois, nous pouvons quantifier, de façon objective, à quel point le nombre masqué est inaccessible au traitement conscient. Nous avons recruté un nouveau groupe de volontaires chez lesquels nous avons examiné la capacité de perception des nombres amorces dans des conditions extrêmes. Nous fournissions à ces nouveaux volontaires tous les détails sur la nature des nombres amorces utilisés dans notre expérience. Nous leur disions également de focaliser leur attention sur ce nombre amorce, et de négliger totalement le second nombre. Dans ces conditions, parviendraient-ils à recueillir consciemment au moins quelques bribes d'informations sur l'amorce ? La réponse fut clairement non. À la durée de présentation utilisée dans nos expériences, les volontaires entraînés ne parvenaient même pas à dire s'il y avait une amorce ou pas (en fait, ils répondaient presque toujours qu'il n'y en avait pas). Ils étaient encore moins capables de dire si l'amorce était un nombre ou une chaîne aléatoire de lettres. Dans les deux cas, leur capacité de détection, mesurée par la théorie de la détection des signaux dans le bruit, était nulle.

La profondeur du traitement de tels stimuli subliminaux dans le cerveau humain a toujours fait l'objet d'un intense débat en psychologie. Certains psychologues soutiennent qu'un mot subliminal peut éventuellement être analysé au niveau de la forme visuelle de ses lettres, mais certainement pas au niveau de son sens. Nos données montrent clairement que leur scepticisme n'est pas justifié. Plusieurs résultats démontrent que le nombre amorce, quoique totalement invisible, peut être comparé inconsciemment avec un autre nombre, ce qui implique que son sens — la quantité qu'il représente — a été analysé. Tout d'abord, les réponses de nos sujets sont accélérées lorsque le nombre invisible représente une quantité proche de celle du nombre qu'ils ont à juger consciemment. Ainsi,

il est plus facile de juger consciemment que 6 est plus grand que 5 lorsque cette présentation est précédée du nombre subliminal 9 (qui est également plus grand que 5), que lorsqu'elle est précédée du nombre 1 (qui est plus petit que 5). À l'extrême, cette facilitation devient très importante lorsqu'il y a répétition de la même quantité dans le nombre amorce et dans le nombre cible. « Voir » le chiffre 4, inconsciemment, quelques centièmes de secondes avant de le revoir, cette fois consciemment, accélère grandement notre vitesse de traitement de l'information numérique.

Crucialement, le changement de notation n'affecte en rien le traitement subliminal des quantités. Même lorsque les nombres cibles et amorces sont présentés dans des notations différentes (par exemple amorce QUATRE, cible 4), le même degré de facilitation est observé. Ainsi, l'influence inconsciente s'exerce à un niveau de traitement sémantique des informations qui ne dépend pas de la notation utilisée. Serait-ce donc la représentation spatiale des quantités ? Grâce à l'IRM, nous avons pu visualiser directement les aires cérébrales traversées par l'information inconsciente, et démontrer l'implication du cortex pariétal. La répétition subliminale d'un même nombre conduit à une habitude de l'activation cérébrale dans les régions pariétales qui sous-tendent le sens approximatif des quantités. L'influence du nombre invisible s'étend même bien au-delà : les aires motrices, qui s'activent lorsque nous préparons un mouvement de la main, montrent une pré-activation induite par l'amorce. Si par exemple, le nombre invisible est plus petit que 5 alors que le suivant est plus grand, on pourra voir s'activer très brièvement l'aire de contrôle de la main gauche, puis la rectification de cette activation en direction de la main droite. Il s'agit là de la première démonstration qu'un stimulus inconscient peut traverser le cerveau de part en part, depuis les aires visuelles jusqu'aux représentations sémantiques et aux circuits moteurs, sans pour autant que le sujet s'en aperçoive.

Que conclure de ces expériences ? Le traitement subliminal des mots fait l'objet d'un très vieux débat en sciences cognitives, et il ne suffira sans doute pas de quelques nouveaux résultats pour convaincre les plus sceptiques. Néanmoins, notre expérience apporte de l'eau au moulin de ceux qui, tels le psychologue anglais Anthony Marcel, affirment depuis longtemps que notre cerveau restitue inconsciemment le sens des mots. Nos manipulations indiquent qu'une chaîne sensori-motrice complexe, qui implique une opération mathématique, peut s'exécuter sans conscience. La particularité de nos expériences est de démontrer que même des instructions arbitraires — appuyez à droite si vous voyez un nombre plus grand que 5 — sont susceptibles de s'exécuter intégralement sans être accompagnées d'un sentiment de contrôle conscient. Quelles sont les limites du traitement inconscient dans le cerveau ? Y a-t-il certaines opérations qui ne peuvent s'effectuer que sous contrôle conscient ? Ces fonctions pourraient-elles expliquer l'avantage évolutif qu'a apporté l'émergence de la conscience chez les primates supérieurs et

l'homo sapiens? L'exploration de ces questions permettra peut-être de confirmer ou infirmer les introspections des mathématiciens qui rapportent que même des opérations aussi complexes que la démonstration d'un théorème d'algèbre sont susceptibles de s'exécuter en l'absence de conscience.

Perdre l'intuition du nombre

L'intuition du nombre est si profondément ancrée dans la profondeur de nos sillons pariétaux, si inconsciemment présente derrière le moindre de nos calculs, que nous n'en réalisons pas l'importance. Nous comprenons sans le moindre effort que 3 est plus petit que 5. Il nous paraît tellement évident que 2 et 2 font 4 que nous ne nous interrogeons guère sur l'appareil cérébral qui est à l'origine de cette intuition.

Nous ne prenons conscience de son importance, paradoxalement, que lorsqu'elle se détériore. Depuis près de quatre-vingts ans, les neurologues savent qu'une lésion cérébrale de la région pariétale, à l'âge adulte comme dans la petite enfance, peut entraîner une incapacité totale de comprendre ce que signifient les nombres. Dans certains cas, le déficit est si global que même la lecture et l'écriture des nombres deviennent impossibles ; ces objets deviennent soudain si vides de sens que le patient est incapable d'en faire le moindre usage. D'autres patients peuvent conserver de bonnes capacités de lecture et d'écriture des nombres, voire de récitation par cœur de la table de multiplication. Cependant, même s'ils se souviennent des mots « trois fois neuf, vingt-sept », ils n'en connaissent plus le sens.

À l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, le professeur Laurent Cohen et moi-même avons examiné un homme âgé d'une soixantaine d'années et qui avait eu l'infortune de subir un accident vasculaire dans la région pariétale droite. Il éprouvait de telles difficultés de soustractions que nous avons dû interrompre le test après qu'il ait échoué sur le calcul de $3-1$ (il avait répondu 7). Ses difficultés n'étaient pas liées à une modalité particulière de présentation : il faisait autant d'erreurs, que les problèmes lui soient présentés par écrit ou par oral, et qu'il doive produire le résultat à haute voix ou se contenter de le sélectionner parmi plusieurs. Il échouait également dans des tests de comparaison, jugeant par exemple que 6 était plus petit que 5. Dans un test de bissection, il jugea tout naturellement que le nombre qui tombe entre 2 et 4 est 6 « parce que deux-quatre-six ». Il comprenait pourtant notre requête, puisqu'il savait dire quel jour tombe entre mardi et jeudi, ou quelle lettre se situe entre B et D. Seul le domaine des nombres semblait dramatiquement détérioré.

Nous disposons aujourd'hui de plusieurs observations similaires, chez des patients de tous âges et de tous pays. Toutes indiquent

que les lésions de la région pariétale s'accompagnent de troubles sévères de l'intuition des quantités — y compris, semble-t-il, chez le très jeune enfant. La dyscalculie du développement est un trouble de l'arithmétique comparable à la dyslexie en ce qu'elle touche une fraction importante des enfants (entre 3 et 6 % selon les rares enquêtes épidémiologiques disponibles). Certains au moins de ces enfants souffrent de déficits isolés de l'arithmétique, remarquablement comparables à ceux que l'on peut observer chez l'adulte après un accident vasculaire. Mes collègues anglais Brian Butterworth et Luisa Girelli ont ainsi étudié un jeune adulte d'intelligence normale, appelé Charles, qui a toujours souffert de difficultés extrêmes avec les nombres. Charles possède une thèse de psychologie, maîtrise le langage à la perfection, et a bénéficié d'une éducation normale doublée de cours particuliers en mathématiques. Néanmoins, il doit toujours compter sur ses doigts pour réaliser le moindre calcul. Les tests psychologiques révèlent au moins deux déficits majeurs. Premièrement, Charles n'a aucune perception immédiate du nombre. Il est incapable de décider combien d'objets sont présents devant lui, même s'il n'y en a que 2 ou 3, si on ne lui laisse pas le temps de les compter. Deuxièmement, l'intuition de la taille des nombres lui fait défaut. Nous prenons normalement d'autant moins de temps pour comparer deux nombres que la distance qui les sépare est grande, sans doute parce que des nombres clairement séparés sont plus faciles à positionner mentalement sur l'espace des quantités. Chez Charles, cet effet de distance est inversé : il lui faut d'autant « plus » de temps que les nombres sont distants, parce qu'il doit compter même pour se rendre compte que 9 est plus grand que 2.

Aucun examen d'imagerie cérébrale n'a été proposé à Charles. Cependant, un autre cas de dyscalculie du développement, récemment examiné en spectroscopie par résonance magnétique, montre une anomalie focale du métabolisme exactement là où nous postulons que se situent les circuits neuronaux de la compréhension des quantités : la région pariétale inférieure. Il semble que, bien avant la naissance, la migration neuronale des neurones du cortex pariétal ait été anormale. Certaines maladies génétiques, mais aussi d'autres facteurs tels que la prématurité ou l'exposition à l'alcool au cours de la grossesse, semblent favoriser ces dysfonctionnements cérébraux précoces et accroître l'incidence de la dyscalculie.

Intuition et éducation mathématique

La dyscalculie du développement, plus que toute autre donnée empirique, place le cerveau au cœur de notre compétence mathématique. On a cru voir dans les mathématiques une construction

culturelle fondée sur l'invention de symboles et de règles formelles, ou encore un langage universel pour décrire la structure de l'univers. Mais cette construction, ce langage, ne prennent leur sens que parce que notre cerveau est doté, dès la naissance, de circuits neuronaux aptes à saisir la structure intuitive du domaine qui deviendra celui des mathématiques. Si les mathématiques de haut niveau se construisent grâce au langage et à l'éducation, leurs fondements les plus élémentaires — concepts de nombre, mais aussi d'espace, de temps, d'opération... — sont à rechercher dans l'organisation même de notre cerveau. Les recherches en neurosciences cognitives de l'arithmétique confirment de façon éclatante la modularité des opérations cérébrales. Le cerveau n'est pas un organe isotrope qui absorberait comme une éponge la culture de son environnement. Il est plutôt comme une collection d'organes, chacun pré-adapté pour préparer l'enfant en développement à trouver, dans son environnement, des points de repères cognitifs. L'école, que ce soit en mathématiques ou dans d'autres domaines, ne peut construire que sur ces intuitions fondatrices incrustées dans nos circuits cérébraux au cours de l'évolution. Qu'une maladie neurologique interfère avec l'une de ces pré-adaptations, et c'est un domaine du savoir, l'arithmétique peut-être, qui risque de s'étioler, voire de disparaître.

Replacer le cerveau et ses représentations modulaires aux fondements de l'apprentissage des mathématiques n'oblige pas à adhérer à une forme naïve de réductionnisme. Il ne faut nier ni l'existence de représentations cérébrales stables des objets mathématiques, ni l'influence de la culture et de l'éducation sur ces états neuronaux. Les états d'activité que nous voyons par imagerie cérébrale chez l'adulte sont le résultat des contraintes croisées de l'apprentissage et de la structure initiale des réseaux cérébraux. Souligner le rôle des contraintes biologiques n'implique aucun fixisme, ni aucune passivité face au handicap. De même que la myopie se soigne par le port de lunettes, rien n'interdit de penser que l'étude attentive des réseaux neuronaux des dyscalculiques ne conduira pas au développement de stratégies d'éducation ou de rééducation optimisées pour ces enfants. Au minimum pourra-t-on éviter que ces élèves, qui sont répétés le d'intelligence normale dans de nombreux domaines, ne soient étiquetés comme cancrs ou paresseux et découragés de poursuivre leurs études.

Inversement, l'existence d'une base biologique universelle du sens des nombres n'implique en rien que celle-ci montre des variations anormales chez les surdoués des mathématiques. S'il existe d'authentiques déficits de l'intuition numérique, rien, pour l'instant, n'indique que dans la population normale, certains naîtraient dotés d'une plus grosse « bosse des maths ». Bien au contraire, tout suggère que l'intuition numérique fait partie du patrimoine génétique de tous, mais qu'elle est susceptible de s'épanouir à des degrés divers selon le travail et la passion que nous y apportons. Les

enquêtes internationales montrent que les stratégies éducatives européennes, américaines ou asiatiques ont un impact radical sur le taux de réussite des étudiants aux mêmes tests. Les biographies des plus grands mathématiciens soulignent que ceux-ci ont travaillé et réfléchi intensément et quotidiennement, souvent dès le plus jeune âge, avant de voir leur talent s'épanouir. Peut-être le mathématicien de talent est-il celui qui, mieux que les autres, sait exploiter les multiples intuitions que notre cerveau projette sur le monde.

RÉFÉRENCES

- DEHAENE (S.), *La Bosse des maths*, Paris, Odile Jacob, 1997.
- BUTTERWORTH (B.), *The Mathematical Brain*, London, Macmillan, 1999.
- DEHAENE (S.), SPELKE (E.), STANESCU (R.), PINEL (P.) et TSIVKIN (S.), « Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence », *Science*, n° 284, p. 970-974, 1999.
- DEHAENE (S.), NACCACHE (L.), LE CLECH (G.), KOECHLIN (E.), MUELLER (M.), DEHAENE-LAMBERTZ (G.), VAN DE MOORTELE (P.-F.) et LE BIHAN (D.), « Imaging unconscious semantic priming », *Nature*, n° 395, p. 597-600, 1998.
- LEVY (L.-M.), REIS (I.-L.) et GRAFMAN (J.), « Metabolic abnormalities detected by H-MRS in dyscalculia and dysgraphia », *Neurology*, n° 53, p. 639-641, 1999.
- WITELSON (S.-F.), KIGAR (D.-L.) et HARVEY (T.), « The exceptional brain of Albert Einstein », *Lancet*, n° 353 (9170), p. 2149-53, 1999.