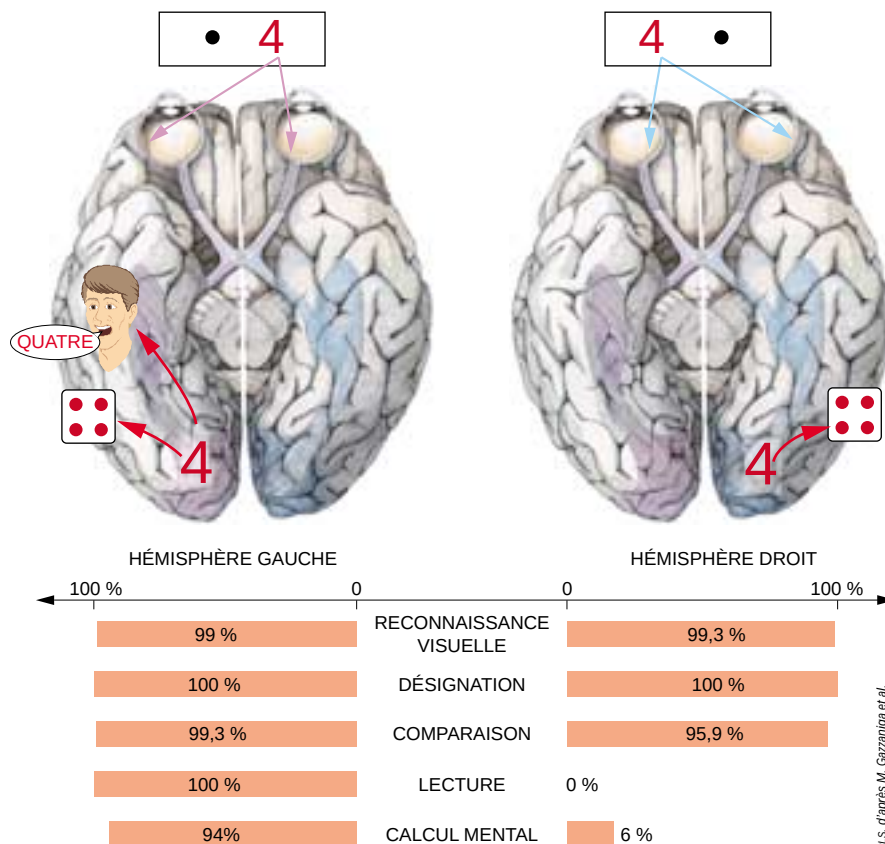


bral entre en activité, il s'ensuit, quelques secondes plus tard, une augmentation locale du débit sanguin et du taux d'oxygénation du sang dans les vaisseaux qui irriguent les régions cérébrales actives. Cette augmentation, confinée à l'intérieur de la boîte crânienne, peut être observée de l'extérieur par l'injection d'un traceur radioactif qui s'accumule préférentiellement dans les régions actives et dont la distribution spatiale est reconstruite à partir de la distribution des rayonnements émis, mesurée par une caméra à positons.

Dès 1985, P. Roland et L. Friberg, à l'Université de Copenhague, ont ainsi observé l'activité corticale lors de soustractions répétées de 3 en 3 ($50 - 3 = 47$, $47 - 3 = 44$, $44 - 3 = 41$, etc.) : une intense activité bilatérale de la région pariétale inférieure, accompagnée d'une activité des lobes frontaux sans doute liée à la mémorisation des résultats intermédiaires. Ces résultats ont récemment été reproduits en imagerie fonctionnelle par résonance magnétique, technique plus précise où l'on mesure directement l'état d'oxygénation des molécules d'hémoglobine du sang. Même pendant des soustractions simples, telle $11 - 4$, nous observons une activation intense qui s'étend sur plusieurs centimètres le long du sillon intrapariétal, depuis le fond du sillon postcentral jusqu'à la région pariéto-occipitale. Plusieurs aires cérébrales sont donc vraisemblablement actives.

Nous mesurons aujourd'hui systématiquement l'activité cérébrale au cours de diverses tâches arithmétiques (lecture, comparaison, addition, soustraction, multiplication...). Selon nos premiers résultats, le cortex pariétal droit s'active durant la comparaison de nombres, alors que la multiplication donne lieu à une activité réduite et quasi exclusivement localisée dans l'hémisphère gauche, et la soustraction à des activations bilatérales. Un travail précédent a montré qu'une autre région, le noyau lenticulaire gauche, s'active plus lors de multiplications que lors de comparaisons des mêmes nombres. Or cette région sous-corticale était précisément celle dont la lésion avait causé chez B. une perte de la mémoire des multiplications ! Ainsi, la convergence des résultats obtenus avec des patients et des sujets normaux précise-t-elle les circuits associés à chaque opération.



4. LES DEUX HÉMISPÈRES CÉRÉBRAUX ont des capacités arithmétiques différentes. Ils identifient visuellement les chiffres et savent quelles quantités ils représentent, mais seul l'hémisphère gauche accède à la prononciation et à la mémoire des tables arithmétiques. Les graphes indiquent les scores obtenus pour différentes tâches par un patient dont le corps calleux, reliant normalement les deux hémisphères, est rompu : un chiffre présenté dans la moitié droite ou gauche du champ visuel n'est traité que par l'hémisphère opposé. Le patient peut dans tous les cas dire si deux chiffres sont identiques, désigner du doigt les chiffres correspondant dans un tableau, ou les comparer avec 5 ; il ne peut toutefois les lire à haute voix ou les utiliser dans des calculs mentaux que lorsqu'ils atteignent son hémisphère gauche.

La région pariétale est-elle subdivisée en plusieurs sous-régions, spécialisées pour des nombres de tailles différentes ? Lisa Cipolotti, Brian Butterworth et Gianfranco Denes ont observé une patiente incapable de comprendre les chiffres supérieurs à 4, le sens des nombres 1, 2, 3 et 4 étant préservé. Il n'est pas impossible que les petits et les grands nombres soient représentés dans des régions cérébrales partiellement différentes.

Les étapes du calcul

La cartographie des zones cérébrales et de leurs fonctions, aussi précise soit-elle, ne suffit toutefois pas à comprendre les mécanismes cérébraux de traitement des nombres. Nous devons aussi connaître le déroulement temporel de ces phénomènes. Dans quel ordre et à quelle vitesse les différentes régions deviennent-elles actives ?

La résolution temporelle des images de caméra à positons ou de résonance magnétique est limitée par le temps d'établissement de la circulation sanguine dans les régions actives, qui est de plusieurs secondes. En revanche, la décharge simultanée des dizaines de milliers de neurones d'une région cérébrale en activité produit un minuscule courant électrique, que l'on détecte à la milliseconde près par électroencéphalographie, en apposant des électrodes sur le scalp. La contrepartie de cette excellente résolution temporelle est une perte de résolution spatiale : les signaux électromagnétiques mesurés à la surface du scalp sont parfois ambigus quant à la position des régions activées.

J'ai ainsi reconstitué la séquence temporelle des activations cérébrales lorsque nous comparons deux nombres (voir la figure 5). Je mesurais l'activité électrique du cerveau à l'aide de 64 électrodes réparties à la surface du scalp

d'une personne, tandis qu'elle comparait avec 5 des chiffres arabes (1, 4, 6 ou 9) et des noms de nombres (UN, QUATRE, SIX ou NEUF).

Vers 100 millisecondes après l'apparition du nombre sur l'écran, un potentiel électrique positif sur les électrodes postérieures indique l'entrée en activité de l'aire visuelle primaire. Puis, vers 150 millisecondes une différence

de topographie apparaît selon qu'un chiffre arabe ou un nom de nombre est présenté : ils sont identifiés par des réseaux anatomiques différents. Les chiffres sont reconnus par les régions occipito-temporales ventrales des deux hémisphères, alors que seule la région gauche intervient pour les mots. À ce stade, cependant, aucun effet de distance n'est notable : seule l'identité

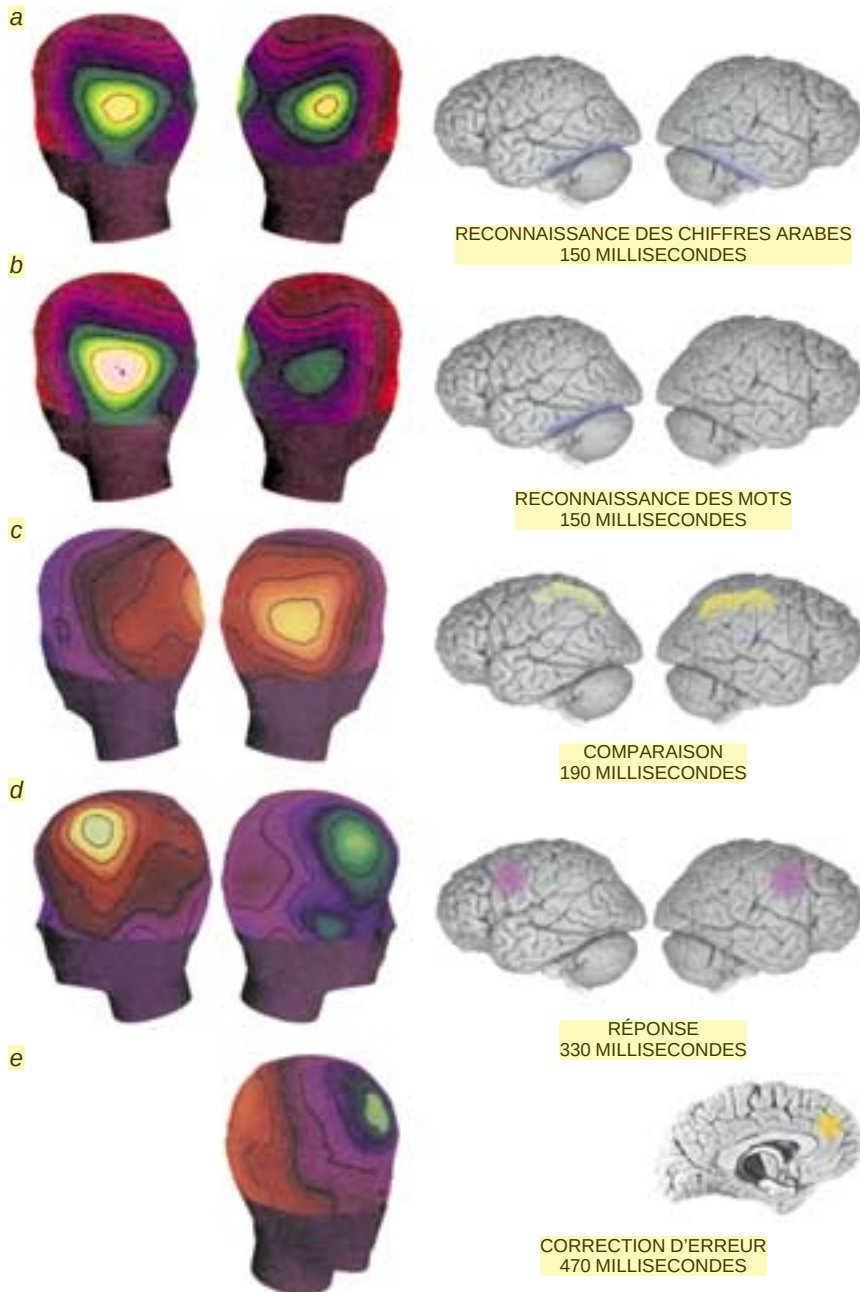
des symboles a été reconnue, mais pas leur sens.

Vers 190 millisecondes, l'effet de distance apparaît. Les sujets sont systématiquement plus lents pour les chiffres 4 et 6 que pour les chiffres 1 et 9. En outre, le potentiel mesuré sur les électrodes situées en regard du cortex pariétal inférieur varie en fonction de la différence du chiffre avec 5. Enfin, la topographie de cet effet est similaire pour les nombres présentés en chiffres arabes et en toutes lettres, ce qui confirme que la région pariétale inférieure ne code pas les nombres sous forme de symboles dans une numération particulière, mais dans un code quantitatif abstrait et indépendant de la notation d'entrée.

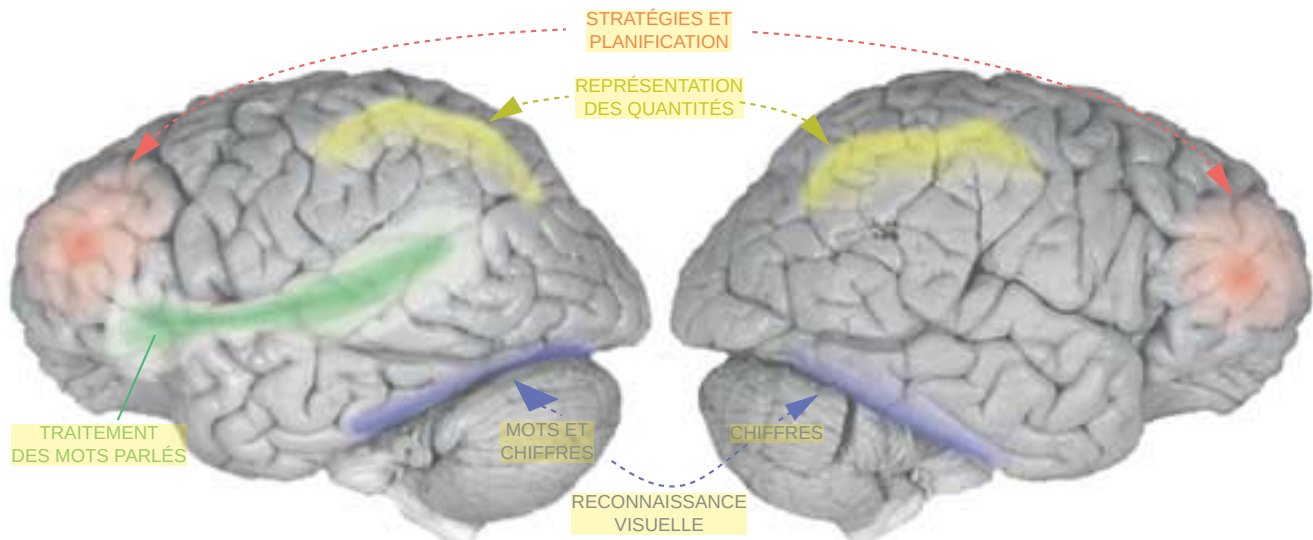
On suit aussi les étapes ultérieures du traitement de l'information. Dès 250 millisecondes, la première différence significative apparaît entre les réponses «plus grand» et «plus petit» : le sujet les donne en appuyant respectivement avec la main droite et avec la main gauche. Dès ce moment, un quart de seconde seulement après l'affichage du nombre, le système moteur commence à être informé de la réponse correcte. L'activation motrice ne culmine toutefois que vers 330 millisecondes, et la réponse elle-même ne survient que vers 400 millisecondes en moyenne. Ensuite, vers 470 millisecondes, on observe l'activation d'une nouvelle aire cérébrale, la région cingulaire antérieure, qui joue un rôle dans le contrôle des autres circuits cérébraux. Dès que le sujet fait une erreur, cette région s'active pour la détecter et tenter de la corriger. On voit alors une reprise de l'activité électrique concomitante de la réponse initiale.

Cette suite d'événements, identification du chiffre, compréhension par la région pariétale inférieure, puis réponse motrice, correspond à ce que nous pouvions déduire de la cartographie des régions cérébrales. L'électroencéphalographie précise toutefois la durée des différentes étapes.

Des expériences semblables révèlent en outre que, si l'on présente deux fois de suite le même chiffre dans la tâche de comparaison, l'étape d'identification est directement suivie de la réponse motrice, sans effet de distance et pour ainsi dire sans activation de la région pariétale inférieure : les sujets détectent la répétition, se remémorent la réponse précédente et la répè-



5. LA SÉQUENCE D'ACTIVATION CÉRÉBRALE, au cours de la comparaison de chiffres avec 5, se déroule selon au moins quatre étapes. Les variations du potentiel électrique à la surface du cerveau (à gauche) reflètent l'activité des régions cérébrales sous-jacentes et indiquent quand les différentes régions cérébrales (à droite) entrent en activité. En 150 millisecondes, le chiffre ou le mot est reconnu (a et b) ; vers 190 millisecondes, la comparaison est faite, activant la région pariétale inférieure (c). Après 330 millisecondes, la personne entame un mouvement du doigt pour donner la réponse en appuyant sur un bouton (d). Enfin, vers 470 millisecondes, la région cingulaire antérieure s'active (e), afin de corriger une éventuelle erreur.



6. PLUSIEURS RÉGIONS CÉRÉBRALES seraient utilisées pour le traitement des nombres. Selon le modèle envisagé, la reconnaissance visuelle active la région occipito-temporale ventrale (en bleu), dans l'hémisphère gauche pour les mots écrits et des deux côtés pour les chiffres arabes. La reconnaissance et la production des mots parlés activent la région périsylvienne de l'hémisphère gauche (en

vert). Les quantités numériques sont représentées dans la région pariétale inférieure des deux hémisphères (en jaune), notamment dans la profondeur du sillon intrapariétal. Enfin, le cortex préfrontal (en rouge) intervient pour mémoriser les résultats intermédiaires et contrôler les stratégies mises en jeu dans les régions postérieures. Au cours d'un calcul, toutes ces régions échangent des informations.

tent. Plus intéressant encore, lorsque nous multiplions deux chiffres, si la multiplication est simple, telle 2×3 , l'activation pariétale est fortement latéralisée à gauche et de courte durée. Si, au contraire, la multiplication est moins familière, telle 8×7 , alors elle semble démarrer dans l'hémisphère gauche avant de s'étendre à la région pariétale droite pendant plusieurs centaines de millisecondes. La taille des nombres manipulés et la nature des opérations effectuées conditionneraient donc les chemins du calcul dans notre cerveau.

L'existence de régions cérébrales spécialisées dans le traitement des nombres pose la question de leur origine. La région pariétale inférieure est-elle déjà en partie opérationnelle chez le très jeune enfant et lui confère-t-elle déjà un sens approximatif des quantités? Des organismes aussi divers que le rat, le pigeon, le dauphin, le chimpanzé et le bébé humain de quelques jours, bien que dépourvus de langage, se représentent mentalement le cardinal d'un ensemble d'objets visuels ou sonores, et même effectuent certaines déductions arithmétiques élémentaires. Un bébé de quatre mois et demi s'attend à ce qu'un ensemble de deux objets auquel on en retranche un n'en contienne plus qu'un seul : il effectue mentalement un analogue, avec des objets concrets, de l'opération arithmétique abstraite $2 - 1 = 1$. Des circuits cérébraux pré-spécifiés pour la représentation des

quantités existeraient donc dès la naissance, indépendamment de toute éducation mathématique. L'apprentissage de la récitation des noms de nombres («un, deux, trois...») et de la forme visuelle des chiffres arabes («1, 2, 3...») permettrait alors ultérieurement d'associer des systèmes de numération symbolique à ce «sens des quantités», l'enfant apprenant à mettre en rapport le mot «quatre», le chiffre «4» et la quantité «:».

Quelle que soit la validité de ce schéma, un principe général d'organisation cérébrale émerge : la modularité des réseaux. Sans que nous en soyons conscients, des dizaines d'aires cérébrales spécialisées, réparties dans les deux hémisphères, s'activent lorsque nous pratiquons le calcul mental. L'information passe sans effort des représentations visuelles, spécialisées dans l'identité des chiffres, aux aires du langage, où les nombres sont codés sous forme de chaînes de mots, et aux aires du «sens quantitatif» où leurs quantités et leurs relations de proximité sont retrouvées. Nous commençons à saisir les principaux nœuds de ce réseau, mais deux questions demeurent en suspens. Quels mécanismes assurent la cohérence des informations numériques réparties et nous donnent l'impression subjective d'effectuer un calcul unique? Comment ces mécanismes de calcul élémentaires cèdent-ils la place, au fil de l'éducation mathématique, à des représentations

cérébrales d'objets mathématiques beaucoup plus élaborés et jusqu'à l'extraordinaire fluidité calculatoire et à la créativité mathématique d'un Einstein, d'un Poincaré ou d'un Ramanujan? Peut-être Hadamard, s'il prenait connaissance de ces interrogations, serait-il frustré de constater que ses questions les plus fondamentales demeurent sans réponse. Il éprouverait sans doute aussi quelque satisfaction à constater que ses méthodes introspectives sont désormais remplacées par de solides techniques expérimentales issues de la neurobiologie et de la psychologie cognitive.

Stanislas DEHAENE est chargé de recherches à l'unité INSERM 334, dans le service hospitalier Frédéric-Joliot du CEA à Orsay.

J. HADAMARD, *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*, éditions Gauthier-Villars, Paris, 1975.

S. DEHAENE et L. COHEN, *Towards an Anatomical and Functional Model of Number Processing*, in *Mathematical Cognition*, n° 1, pp. 83-120, 1995.

M. GAZZANIGA, *Le cerveau social*, éditions Odile Jacob, Paris, 1996.

Le cerveau en action : l'imagerie cérébrale en psychologie cognitive, sous la direction de S. DEHAENE, Presses universitaires de France, Paris, 1997.

S. DEHAENE, *La bosse des maths*, éditions Odile Jacob, Paris, 1997.