

Nous avons récemment repris et approfondi ces observations. Nos résultats confirment qu'une lésion de la région pariétale entraîne une perte profonde du sens quantitatif des nombres. L'un des patients les plus étonnants que nous ayons observés, M., homme de 68 ans atteint d'une petite lésion de la région pariétale inférieure, n'éprouvait aucune difficulté de langage. Il lisait les nombres à haute voix et les écrivait sous la dictée. Pourtant, il ne comprenait plus le sens de ces nombres. Ainsi faisait-il parfois de grossières erreurs de comparaison de nombres, affirmant par exemple que 5 est plus grand que 6. Les soustractions lui posaient aussi d'énormes difficultés. Il ne parvint jamais à déterminer le résultat de $3 - 1$: il affirmait ne plus comprendre ce que cette opération voulait dire, et il proposa successivement pour résultat 7, 5 et 3. Il lui était également impossible de bissecter deux nombres (déterminer le nombre qui est à égale distance de chacun). Lorsque nous lui demandâmes quel nombre est entre 2 et 4, il proposa 7!

La lésion de M. était située dans son hémisphère droit, mais nous pensons que l'organisation cérébrale de ce patient gaucher était symétrique de celle d'une personne normale. Margaret Hittmair-Delazer et Brian Butterworth ont aussi observé un patient similaire, qui comparait les nombres avec de grandes difficultés, et pour lequel l'effet de distance était inversé : il mettait d'autant moins de temps que les nombres étaient proches et semblait compter même pour comparer deux nombres. Son sens des quantités était donc profondément bouleversé.

Le déficit de M. était remarquablement limité aux nombres abstraits : il trouvait sans se tromper l'intermédiaire entre deux lettres, deux notes, deux mois ou deux jours de la semaine, et il manipulait sans difficulté les dates ou les heures, déterminant quelle heure est entre 14 et 16 heures, et convertissant même «2 heures de l'après-midi» en «14 heures», ou «20 heures» en «8 heures du soir». Les opérations arithmétiques abstraites équivalentes $2 + 12$ et $20 - 12$, en revanche, lui étaient impos-

sibles. Seul le sens quantitatif des nombres, qui traite les quantités abstraites, semblait lui manquer.

Une autre dissociation intéressante fut observée entre les opérations arithmétiques. M. souffrait d'énormes difficultés en bissection et en soustraction (respectivement 77 et 75 pour cent d'erreurs), mais il lui était relativement plus facile d'additionner (32 pour cent d'erreurs) ou de multiplier les mêmes chiffres (25 pour cent d'erreurs). Il lui arrivait toutefois d'annoncer le résultat d'une multiplication à haute voix sans paraître comprendre le sens de l'énoncé. Cette observation confirme l'hypothèse que les tables d'addition et de multiplication, qui sont récitées par cœur à l'école élémentaire, s'impriment dans des circuits cérébraux liés à ceux du langage et partiellement indépendants de la représentation quantitative des nombres localisée dans la région pariétale. Cette dernière est en revanche nécessaire pour la soustraction, qui n'est pas apprise par cœur et nécessite un traitement des quantités.

Les multiples circuits de la multiplication

Nous avons d'ailleurs observé la dissociation inverse de celle de M. chez B., institutrice à la retraite atteinte d'une lésion sous-corticale de l'hémisphère gauche. Cette dame ne parvenait plus à réciter les tables de multiplication, ni d'ailleurs l'alphabet, ni *Au clair de la lune*, mais elle pouvait toujours soustraire, comparer, ou bissecter deux nombres ! Cette double dissociation montre que la région pariétale inférieure n'a pas un rôle générique dans l'arithmétique (voir l'encadré ci-contre) : elle ne renferme pas la fameuse «bosse des maths» ni le «sens des rapports des nombres» chers à Gall et aux phrénologues. Tout au plus, cette région contient-elle, dans les deux hémisphères, un codage des nombres sous forme de quantité, tandis que d'autres circuits neuraux spécialisés contribuent au codage de la table de multiplication, des dates, des heures, et même de l'algèbre.

L'existence de tels circuits et le rôle particulier de la région pariétale inférieure dans la manipulation des quantités sont confirmés par des observations directes du cerveau pendant qu'il calcule. Lorsqu'un circuit céré-

La double dissociation

La neuropsychologie, étude scientifique des patients atteints d'une lésion cérébrale, se fonde sur la méthode de la dissociation. En soumettant des patients à plusieurs types d'épreuves, on constate que ceux-ci parviennent à effectuer la tâche A, mais pas la tâche B. Par exemple, deux patients que j'ai étudiés avec Laurent Cohen, à l'Hôpital de la Salpêtrière, ne parviennent plus à lire à haute voix des paires de nombres (10 pour cent de réussite), mais peuvent indiquer lequel des deux nombres est le plus grand (100 pour cent de réussite). Les performances en lecture (tâche A) et en comparaison de nombres (tâche B) sont dissociées. Il est alors tentant de conclure que la lésion a perturbé sélectivement les circuits cérébraux de la lecture, mais non ceux de la comparaison des nombres, et donc que ces tâches sont réalisées par des régions cérébrales partiellement distinctes.

D'autres explications sont toutefois possibles : ainsi, les tâches A et B pourraient utiliser des circuits identiques, mais, la tâche A étant intrinsèquement plus difficile que la tâche B, n'importe quelle diminution non spécifique des facultés intellectuelles diminuerait les performances de A par rapport

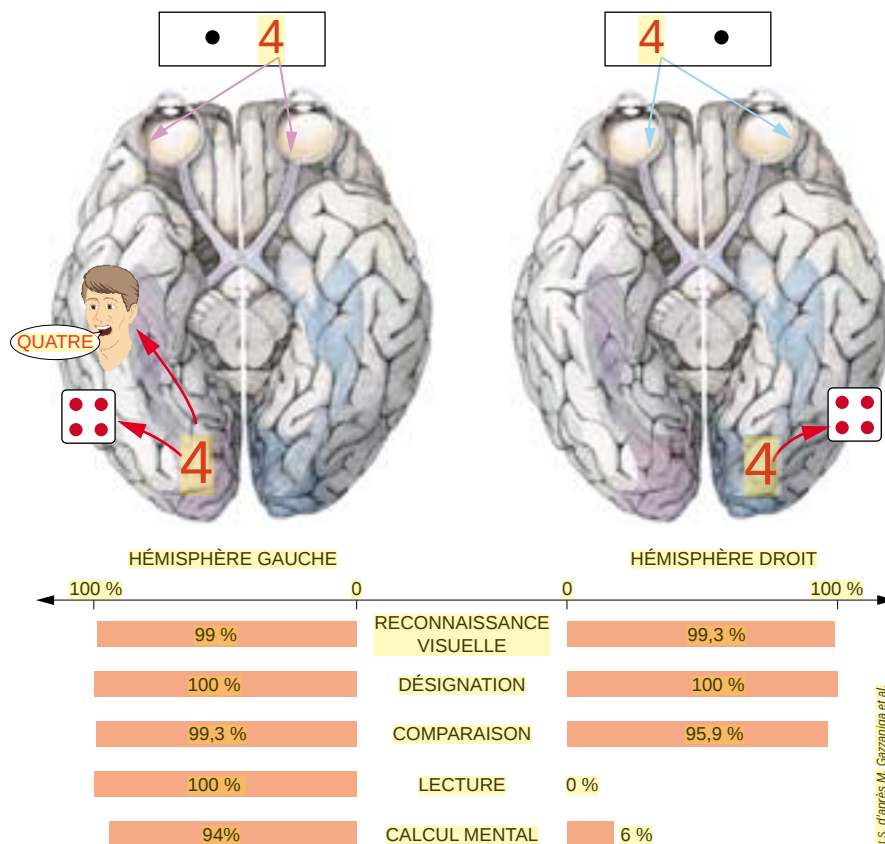
à B. Par exemple, la moindre erreur de perception des chiffres perturbe la lecture, mais pas nécessairement la comparaison : un patient qui lirait la paire de nombres «31, 99» comme «quarante et un, quatre-vingt-dix-huit» les placerait néanmoins dans le bon ordre. De plus, les pourcentages d'erreurs des tâches A et B ne sont pas toujours directement comparables : un patient qui obtiendrait 50 pour cent de réussite en comparaison de nombres ne ferait pas mieux que s'il répondait au hasard, alors que 50 pour cent de réussite en lecture demeurerait un score honorable, puisque, pour des nombres de deux chiffres, la probabilité de répondre correctement n'est que de un pour cent.

Pour toutes ces raisons, les neuropsychologues recherchent l'observation d'une double dissociation : au moins deux patients tels que, dans la tâche A, le patient 2 réussit mieux que le patient 1, et dans la tâche B, le patient 1 réussit mieux que le patient 2. Aucune des deux tâches ne peut alors être jugée intrinsèquement plus difficile que l'autre. Selon le site de la lésion cérébrale, l'une ou l'autre capacité pâtit : on peut alors affirmer qu'elles reposent sur des circuits cérébraux différents.

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