

comparaison sont particulièrement étonnants. Dans un ordinateur, l'algorithme le plus rapide pour comparer des nombres est l'examen successif des chiffres, de la gauche vers la droite. Ainsi peut-on déterminer que 58 est plus petit que 65 en ne comparant que les chiffres des dizaines, 5 et 6. Les unités ne sont prises en compte que si les chiffres des dizaines sont identiques. Notre cerveau ne suit pas la même procédure : tout d'abord, la courbe des temps de comparaison avec 65 ne présente pas de discontinuité particulière pour les nombres qui commencent par 6 ; ensuite, le temps de comparaison dépend du chiffre des unités même lorsqu'il est superflu. Par exemple, les temps de réponse croissent continûment entre 51 et 59, alors même que le chiffre des dizaines suffirait à savoir que ces nombres sont inférieurs à 65.

Notre algorithme mental de comparaison ne décompose donc pas les nombres. Le cerveau humain convertit les petits nombres familiers, de un ou deux chiffres, en représentations internes sur une échelle continue des quantités, puis il compare ces quantités indépendamment des symboles qui les ont véhiculées. La continuité analogique ne disparaît que pour la comparaison de nombres de plus de quatre chiffres : les sujets les comparent chiffre par chiffre, de gauche à droite, mais toujours d'autant plus vite qu'ils sont différents.

D'autres expériences ont précisé les propriétés de ce «sens des quantités». L'effet de distance est quasi identique, que les nombres soient présentés en notation arabe (2), en toutes lettres (deux) ou même sous forme d'un nuage de points : ces notations conduisent, par des voies différentes, à la même représentation abstraite des quantités. L'effet est aussi observé dans des tâches où nous n'avons pas conscience d'effectuer un traitement sémantique des nombres. Lorsque nous décidons si deux chiffres sont identiques ou différents, ce qui paraît ne demander qu'une analyse visuelle superficielle, nous sommes plus lents lorsque les chiffres sont numériquement proches : il nous faut

plus de temps pour décider que 1 est différent de 2, que pour décider que 1 est différent de 9. Même dans cette situation, nous transformons les nombres en quantités internes.

De même, lorsque nous vérifions une addition, nous sommes d'autant plus rapides à répondre «faux» que le résultat proposé est loin de la vérité. En outre, nous comparons plus rapidement le même chiffre 4 avec 5 après une présentation subliminale du mot «trois» qu'après celle des mots «un» ou «neuf» : la présentation d'un nombre, si brièvement que nous n'avons pas conscience de le voir, réduit le temps de traitement de nombres voisins.

L'effet de distance fait donc partie intégrante de la compréhension des nombres. Dès que nous percevons un symbole numérique, chiffre ou mot, parlé ou écrit, nous accédons rapidement et automatiquement à la quantité correspondante sur une sorte de «ligne» organisée par proximité numérique (voir la figure 3).

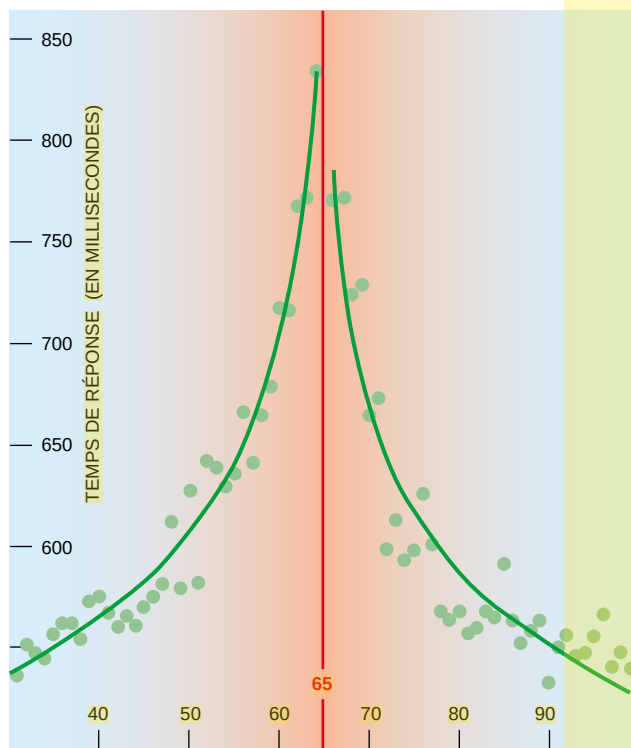
Où cette «ligne numérique» est-elle codée dans le cerveau ? Quelles régions cérébrales reconnaissent-elles la forme des chiffres arabes, et quelles autres interviennent-elles pour en représenter la quantité ? Dans un premier temps, l'examen de patients

atteints de lésions cérébrales a précisé les contributions respectives des hémisphères droit et gauche à l'activité arithmétique.

La spécialisation des hémisphères

Tout ce qui apparaît dans la moitié droite du champ visuel se projette dans l'aire visuelle primaire de l'hémisphère gauche, et *vice versa*. Lorsque nous fixons un point et qu'un chiffre apparaît à gauche de ce point pendant moins de deux dixièmes de seconde, durée insuffisante pour que le regard soit réorienté, le chiffre n'est «vu» que par le cortex visuel de l'hémisphère droit. Chez un sujet normal, l'information passe rapidement à l'autre hémisphère via un épais faisceau de fibres, le corps calleux. Chez certains patients, ce faisceau est sectionné lors d'une intervention chirurgicale visant à traiter une épilepsie rebelle : les deux hémisphères cérébraux sont intacts, mais dans l'impossibilité de communiquer. Le chiffre reste donc confiné à un seul hémisphère, et l'on mesure comment cet hémisphère seul effectue différents calculs.

Michael Gazzaniga et ses collègues de l'Université de Dartmouth ont ainsi découvert que chacun des deux hémisphères détermine si deux chiffres arabes sont identiques ou différents. La forme des chiffres est donc codée et reconnue indépendamment dans l'hémisphère gauche et dans l'hémisphère droit. La capacité d'identification du cardinal d'un ensemble et de la signification d'un chiffre arabe est aussi partagée : les deux hémisphères reconnaissent, dans une certaine mesure, si un chiffre arabe correspond ou non à un ensemble de points (tels 3 et ...). Mieux encore, chaque hémisphère sait comparer deux chiffres, et des nombres à deux chiffres. Enfin, avec Laurent Cohen, de l'Hôpital de la Salpêtrière, nous avons montré que chaque hémisphère présente un effet de distance quasi normal, même si ce dernier est un peu plus prononcé dans l'hémisphère droit que dans l'hémisphère gauche. Chaque



2. NOUS COMPARONS DEUX NOMBRES plus vite quand leur différence est plus grande. Le temps moyen de comparaison d'un nombre avec 65 est fonction du logarithme de sa différence avec ce nombre.

hémisphère possède donc les procédures nécessaires à la fois pour interpréter un nombre écrit en chiffres arabes comme une quantité, et pour comparer deux quantités.

En revanche, le cerveau est nettement asymétrique dans le domaine du langage et du calcul. L'hémisphère gauche, isolément, possède apparemment toutes les capacités arithmétiques d'un sujet normal, mais l'hémisphère droit ne sait ni lire à haute voix, ni calculer. Un patient sans corps calleux, qui voit un chiffre 4 sur la gauche de son champ visuel, et le traite avec son seul hémisphère droit, sait bien que ce chiffre est plus petit que 5. Pourtant, il peut le lire «neuf» et il est totalement incapable de le multiplier par 3 ou de lui ajouter 8 (voir la figure 4).

Depuis les travaux fondateurs de Paul Broca, au XIX^e siècle, on sait que, chez la très grande majorité des gens, les processus de production du langage parlé sont uniquement présents dans l'hémisphère gauche. La section du corps calleux empêche les aires du langage de l'hémisphère gauche de recevoir de l'hémisphère droit les informations sur l'identité du chiffre à nommer. Le patient prononce alors un mot au hasard. De même, seul l'hémisphère gauche semble avoir accès aux tables d'addition et de multiplication, enregistrées sous forme de mots lorsque nous les apprenons en les récitant par cœur.

La plupart de ces résultats sont obtenus avec des patients au corps calleux sectionné chirurgicalement, qui étaient épileptiques depuis l'enfance. L'organisation cérébrale de ces patients est-elle identique à celle d'une personne ordinaire? Nous avons étudié le cas d'une femme de 30 ans, parfaitement normale sur le plan neurologique avant qu'un soudain accident vasculaire cérébral ne détruise la partie postérieure de son corps calleux. Nous observons bien les capacités quasi normales de chacun de ses hémisphères, sans qu'ils aient disposé de beaucoup de temps pour se réorganiser. Or, comme chez les patients précédents, son hémisphère gauche identifiait, comparait, prononçait, additionnait et multipliait les chiffres, tandis que son hémisphère droit ne pouvait que les identifier et les comparer.

Une autre source de données provient de patients atteints de lésions étendues de l'hémisphère gauche. Les capacités numériques de ces patients

sont à peu près celles de leur hémisphère droit seul. Jordan Grafman, de l'Institut américain de la santé de Bethesda, a étudié un ancien combattant du Viêt Nam dont la quasi-totalité de l'hémisphère gauche avait été arrachée par une rafale de mitrailleuse. Ce patient lisait et écrivait très difficilement, mais il pouvait identifier et comparer des nombres de un ou deux chiffres. Il comprenait donc toujours quelles quantités étaient associées aux chiffres. Ses capacités de calcul s'arrêtaient aux additions et aux soustractions les plus élémentaires telles que $2 + 2$.

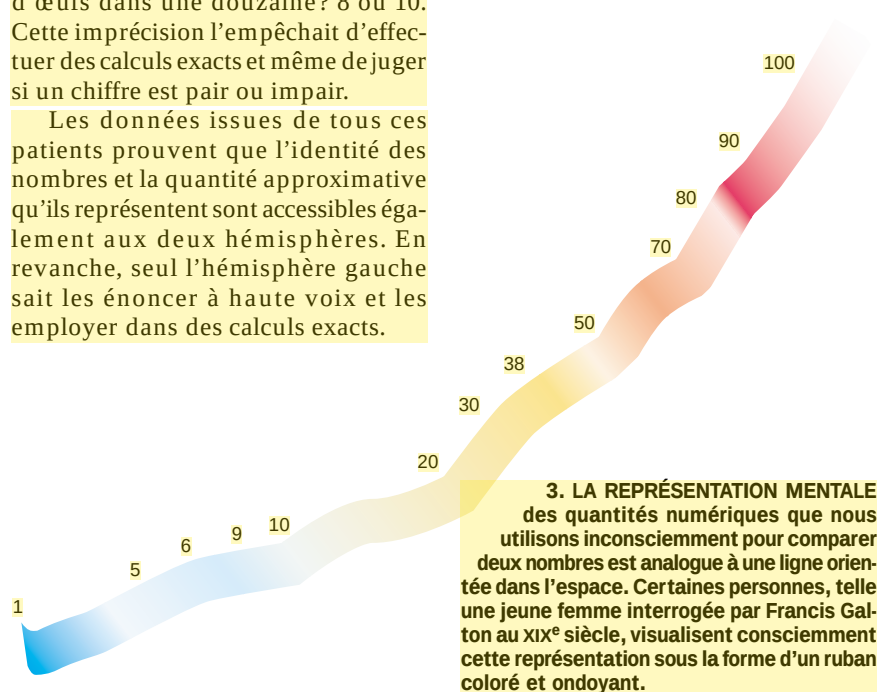
Lésions sélectives

Nous avons décrit le cas d'un patient encore plus spectaculaire, N., atteint d'une vaste lésion de la partie postérieure de l'hémisphère gauche. N. était très handicapé lorsqu'il devait lire, écrire ou calculer, énonçant sans sourciller que $2 + 2$ fait 3! Pourtant, il conservait un sens quantitatif des nombres : il savait toujours comparer deux nombres (même s'il était incapable de les lire à haute voix), avec un effet de distance normal ; il pouvait aussi faire des additions approximatives et savait donc que $2 + 2$ n'est pas égal à 9. N. paraissait ne se représenter les quantités numériques que de façon approximative. Il ne savait plus donner que des réponses approchées aux questions les plus diverses. Combien de jours dans l'année? 350, répondait-il. Combien d'œufs dans une douzaine? 8 ou 10. Cette imprécision l'empêchait d'effectuer des calculs exacts et même de juger si un chiffre est pair ou impair.

Les données issues de tous ces patients prouvent que l'identité des nombres et la quantité approximative qu'ils représentent sont accessibles également aux deux hémisphères. En revanche, seul l'hémisphère gauche sait les énoncer à haute voix et les employer dans des calculs exacts.

Quels réseaux d'aires cérébrales, dans chaque hémisphère, sont-ils responsables de la reconnaissance des chiffres, de leur lecture et de leur compréhension? Nous en avons identifié quelques-uns. La forme visuelle des chiffres arabes, par exemple, est analysée par les circuits de la voie occipito-temporale ventrale des deux hémisphères : un patient atteint d'une lésion de ces régions lit difficilement les chiffres, mais il peut les écrire ou les répéter. La compréhension et la production des mots parlés fait intervenir les régions périsylviennes de l'hémisphère gauche, et de nombreux patients atteints de lésions de ces régions souffrent de difficultés à énoncer ou à comprendre les noms de nombres qu'ils entendent.

Quant au sens quantitatif des nombres, il fait intervenir les régions pariétales inférieures des deux hémisphères. Les travaux du neurologue allemand S.E. Henschen en 1919 et 1920, puis ceux de J. Gerstmann en 1940, enfin ceux d'Henri Hécaen à l'Hôpital de la Salpêtrière dans les années 1950 ont établi que des patients présentant des lésions de la région pariétale gauche ne savent plus calculer, alors qu'ils peuvent toujours nommer et écrire les nombres. Selon ces observations, la région pariétale inférieure n'intervient pas directement dans l'identification et la production des nombres, mais plutôt dans la manipulation interne des quantités numériques suivant les règles de l'arithmétique.



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.