

NEUROSCIENCES

■ **EN DEUX MOTS** ■ On en parle peu, et pourtant ils existent. Les troubles du calcul sont assez répandus. D'où peuvent-ils venir? Le laboratoire de neuro-imagerie cognitive d'Orsay s'est intéressé à la dyscalculie dévelop-

pe mentale qui apparaît chez des enfants ayant une intelligence normale et vivant dans un contexte social équilibré. Selon les premiers résultats, elle serait due à un trouble primaire de la perception des nombres. Vers

2 ou 3 ans, l'utilisation des doigts pourrait jouer aussi un rôle fondamental. C'est ce que tente de démontrer l'équipe du laboratoire de psychologie sociale de l'université Blaise-Pascal à Clermont-Ferrand.

7 - 1. Dyscalculie, le sens perdu des nombres 2 !



Dès l'âge de 6 mois, le nourrisson sait discriminer les petites quantités. Pourtant, certains enfants atteints de dyscalculie ne parviendront jamais à effectuer les calculs les plus élémentaires. Aujourd'hui, il existe un espoir de les rééduquer. Car on commence à comprendre les fondements cérébraux de ce trouble du développement.

Certains enfants, bien qu'ayant une intelligence normale, n'arrivent pas à résoudre des opérations aussi simples que 7-3. D'autres ne parviennent pas à évaluer à l'œil nu de petites quantités, même lorsqu'il n'y a que deux ou trois objets devant eux. En outre, ils ont le plus grand mal à comprendre qu'un nombre puisse être plus grand qu'un autre. Plusieurs études parues aux États-Unis et en Israël estiment que 5% des enfants ont des difficultés inhabituelles dans l'apprentissage de l'arithmétique [1, 2]. Ce trouble est appelé dyscalculie développementale. Il se rapproche de la dyslexie, qui se manifeste, elle, par des difficultés dans l'apprentissage de la lecture. Comme cette dernière, il peut être détecté chez des enfants qui présentent un quotient intellectuel (QI) normal ou supérieur à la moyenne, et qui vivent dans un environnement social et familial sans problème majeur (lire ci-contre «Trois critères de diagnostic»). Comme elle aussi, la dyscalculie peut ou non être associée à d'autres déficits cognitifs (problèmes d'orientation dans l'espace, troubles de la motricité, de l'attention, etc.).

Nuls en maths

Pourtant, la dyscalculie est bien moins connue et étudiée que la dyslexie. Sans doute parce que certains enfants arrivent à la dissimuler en développant des stratégies de contournement, par exemple en apprenant par cœur la table de multiplication sans en comprendre le sens. Alors que d'autres se contentent d'admettre sans sourciller, avec

leurs parents et leur instituteur, qu'ils sont tout simplement «nuls en maths», sans chercher à comprendre pourquoi. À l'âge adulte, les dyscalculiques continuent à rencontrer des difficultés dans la vie quotidienne: bien souvent, ils ne comprennent pas le prix d'un produit, ne savent pas estimer une distance ou la taille d'un objet. Leur parcours professionnel peut s'en trouver affecter. Même si des rééducations existent, leur efficacité reste mal connue. Si l'on parvenait à identifier une cause primaire propre à toutes les formes que peut revêtir ce trouble, cela pourrait changer la donne.

Contributions génétiques

D'où provient la dyscalculie développementale? Il existe probablement une contribution génétique: chez les jumeaux homozygotes, si l'un est atteint, l'autre l'est également dans 70% des cas [3]. La dyscalculie est souvent présente, quoique pas toujours, dans des pathologies d'origine génétique comme le «syndrome de Turner*», l'X fragile*, ou encore le «syndrome de Williams*». Cependant, les facteurs environnementaux occupent aussi une place importante, en particulier dans les phases précoces du développement cérébral. Ainsi, on observe une fréquence plus élevée de dyscalculie chez les enfants nés prématurément et chez ceux qui sont exposés pendant la période foetale à l'intoxication alcoolique de leur mère [4].

Au-delà de ces facteurs génétiques et environnementaux, comment étudier les causes de la dyscalculie? Comment remonter à sa source, alors que les enfants dyscalculiques présentent souvent d'autres perturbations associées? Dans notre laboratoire du service hospitalier Frédéric-Joliot (SHFJ), nous pensons aujourd'hui que, chez un grand nombre d'enfants, la dyscalculie développementale est liée à un trouble primaire de la perception des nombres, en rapport avec une désorganisation des neurones de la région intrapariétale du cortex. Plusieurs travaux nous ont mis sur cette piste.

Tout d'abord, il existe vraisemblablement une cause spécifique à ce trouble. Quelques exemples remarquables de dyscalculie sans déficits associés le mettent en évidence. Ainsi, le neuropsychologue britannique Brian Butter-

Stanislas Dehaene, directeur de recherche à l'Inserm et responsable de l'unité mixte Inserm-CEA de «neuro-imagerie cognitive» à Orsay.

Nicolas Molko, neurologue, a réalisé sa thèse de sciences en 2003 sur les bases cérébrales de la dyscalculie.

Anna Wilson, chercheuse post-doctorat dans l'unité mixte Inserm-CEA, développe un logiciel de rééducation de la dyscalculie.

[1] V. Gross-Tsur, *Dev. Med. Child Neurol.*, 38, 25, 1996.

[2] R.S. Shalev et al., *Pediatr. Neurol.*, 24, 337, 2001.

[3] M. Alarcon et al., *J. Learn Disabil.*, 30, 617, 1997.

[4] K. Kopera-Frye et al., *Neuropsychologia*, 34, 1187, 1996.

Trois critères de diagnostic

■ LA DYSCALCULIE EST DITE DÉVELOPPEMENTALE CAR ELLE AFFECTE L'APPRENTISSAGE chez l'enfant. Elle se distingue de l'acalculie acquise à la suite d'une lésion cérébrale chez l'adulte. Elle peut se diagnostiquer selon trois critères définis dans la classification américaine des troubles mentaux DSM IV :

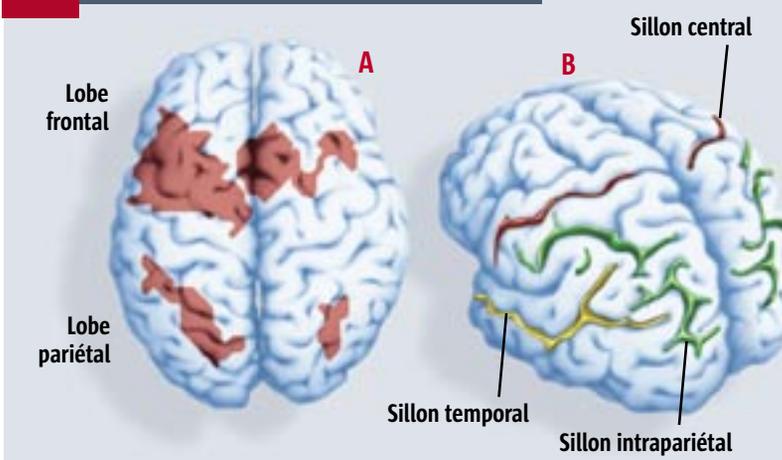
- les aptitudes arithmétiques, évaluées par des tests standardisés, sont nettement en dessous du niveau escompté compte tenu de l'âge du sujet, de son développement intellectuel et d'un enseignement approprié à son âge ;
- le trouble interfère de manière significative avec la réussite scolaire de l'enfant ou les activités de la vie courante ;
- les difficultés mathématiques ne sont pas liées à un déficit sensoriel.

* Le «**syndrome de Turner**» affecte uniquement les filles et se manifeste par des désordres physiologiques et des troubles cognitifs modérés.

* Le **syndrome de l’X fragile** se caractérise chez les garçons par un retard mental associé à des troubles de l’attention, une hyperactivité et, parfois, des traits autistiques.

* Le «**syndrome de Williams**» se manifeste par des déficits importants de la perception visuospatiale et de l’arithmétique, et *a contrario* des performances verbales très développées.

Fig.1 Les régions cérébrales du calcul



L’**IMAGERIE CÉRÉBRALE A PERMIS DE LOCALISER** précisément un large réseau qui s’active lors du calcul mental (A). Il implique de multiples régions qui sont distribuées dans les lobes frontaux et pariétaux, et varie en partie suivant le type de calcul effectué : comparaison, addition, soustraction ou multiplication. Le sillon intrapariétal est systématiquement activé (B) pour toutes les tâches qui nécessitent une manipulation des quantités, mais pas le sillon central, ni le sillon temporal. Le sillon intrapariétal est aussi impliqué dans d’autres fonctions comme le langage, l’attention, les saccades oculaires.

© INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

⇒ worth décrit le cas d’un homme désigné par les initiales C. W. Âgé de 30 ans, il présente une intelligence tout à fait normale et a reçu une éducation poussée. Pourtant, il n’arrive pas à résoudre de simples additions et soustractions dès que les chiffres dépassent 5. Plus étonnant encore, il n’arrive pas à déterminer rapidement, lors d’une

simple comparaison de deux chiffres, lequel est le plus grand. C. W. présente une dyscalculie particulièrement sévère. Son histoire suggère qu’il a été dépourvu de toute capacité de perception numérique dès l’enfance.

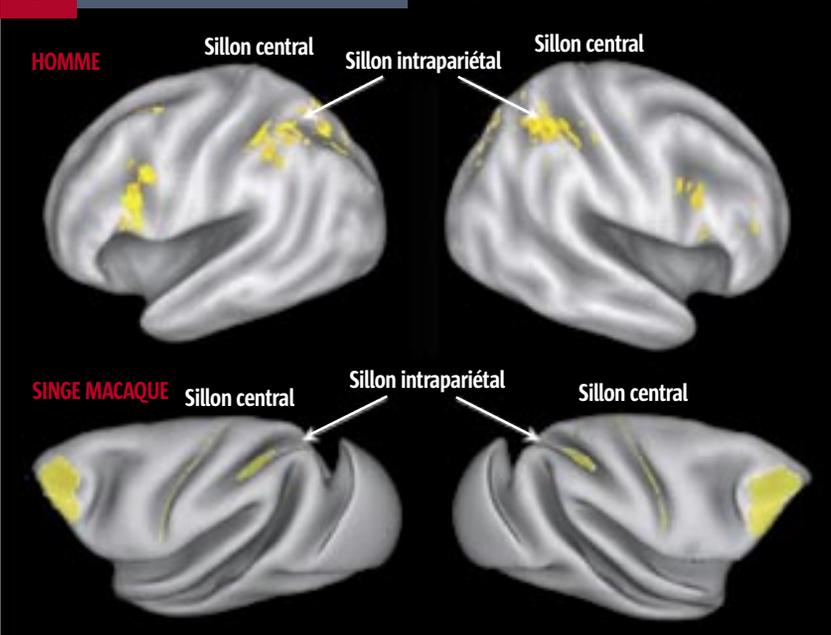
Un autre cas, rapporté par le neurobiologiste américain Lucien Levy, illustre à quel point ce déficit peut être sélectif [5]. J. S., un jeune homme de 18 ans, montre des troubles sévères du calcul dès l’école élémentaire, associés à une difficulté pour compter sur ses doigts (lire l’article p. 47). Cependant, J. S. présente une intelligence tout à fait normale, voire supérieure, dans les autres domaines cognitifs. Il a même eu un parcours scolaire brillant, couronné par différents prix pour des inventions mécaniques. Malgré les nombreuses stratégies élaborées pour compenser ses problèmes avec les nombres, la dyscalculie de J. S. se manifeste clairement quand la difficulté des calculs augmente, et quand ses stratégies de contournement sont mises en échec.

Lésions cérébrales

Dans ces deux cas, la paresse, un manque de motivation ou une scolarité inappropriée ne peuvent expliquer les difficultés rencontrées lors de l’apprentissage de l’arithmétique. Un déficit biologique plus spécifique semble être en cause. Un deuxième indice va dans ce sens : l’existence d’une similarité de symptômes entre la dyscalculie développementale de l’enfant et l’acalculie qui touche certaines personnes, à la suite d’un accident vasculaire cérébral. Ces patients dits «**acalculiques**» ne présentent pas forcément de troubles du langage, de la lecture ou de la mémoire. Cependant, alors qu’ils maîtrisaient parfaitement les bases de l’arithmétique avant leur accident, ils sont incapables de résoudre la moindre opération ou d’estimer les quantités. Ils ont perdu le sens élémentaire des nombres [6, 7, 8].

Les lésions qui conduisent à cette pathologie affectent le plus souvent la région pariétale gauche, qui paraît

Fig.2 Les neurones du calcul



LES DEUX RÉGIONS OÙ L’ON A OBSERVÉ DES NEURONES SENSIBLES AU NOMBRE chez le singe macaque sont le cortex préfrontal et le fond du sillon intrapariétal (colorées en jaune dans l’image du bas). La localisation de ces régions rappelle celle des régions impliquées dans la manipulation des quantités chez l’homme (colorées en jaune dans l’image du haut). Dans la zone intrapariétale, l’homologie entre le macaque et l’homme est frappante : cette région pourrait avoir été largement conservée au cours de l’évolution. Dans le cortex préfrontal, en revanche, une déformation serait nécessaire pour faire coïncider les régions, ce qui suggère un degré plus important de réorganisation au cours de l’évolution.

© UNITÉ DE NEUROIMAGES COGNITIVES/INSERM-CEA

Le sens des nombres, un avantage évolutif ?

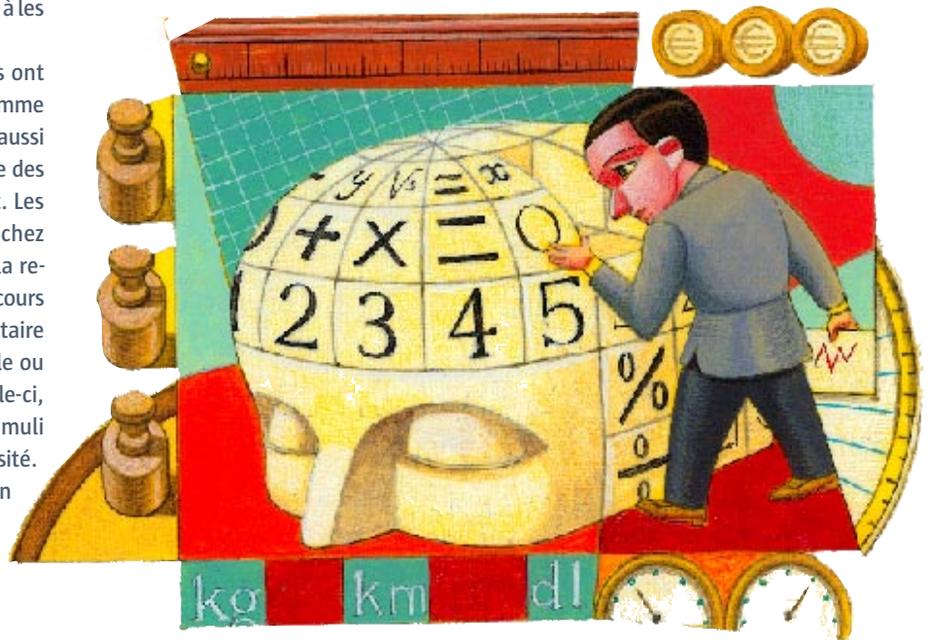
■ QU'EST-CE QU'UN NOMBRE POUR LE CERVEAU ? Comment apparaît la représentation mentale des nombres au cours du développement cérébral* ? Le sens des nombres est-il spécifiquement humain ? Contrairement aux théories élaborées dans les années cinquante, suggérant l'apparition tardive des capacités numériques chez l'enfant, des tests non verbaux ont montré que le nourrisson, dès l'âge de 6 mois, dispose de capacités insoupçonnées à discriminer des petites quantités, à les additionner ou à les soustraire.

Plusieurs études comportementales ont montré que de nombreux animaux, comme les singes, les dauphins, les oiseaux et aussi les rongeurs, ont un sens élémentaire des nombres similaire à celui de l'enfant. Les études de la perception numérique chez l'animal et l'homme suggèrent que la représentation mentale des nombres au cours de l'évolution suit un principe élémentaire qui s'applique à la perception visuelle ou auditive, la « loi de Weber ». Selon celle-ci, le seuil de discrimination de deux stimuli augmente en proportion de leur intensité. Cette caractéristique de la représentation numérique est mise en évidence lors d'une simple tâche de comparaison de deux nombres en faisant varier la

taille des nombres (« effet de taille ») et la distance qui les sépare (« effet de distance ») [17]. Les hommes, comme les animaux, discriminent plus facilement les différences entre les nombres lorsqu'ils sont de petite plutôt que de grande taille : notre cerveau perçoit plus facilement la différence entre 4 et 5 qu'entre 64 et 65 ; et lorsque la distance qui sépare les nombres augmente : la différence entre 64 et 68 est plus facile à discriminer que celle entre 64 et 65. Cette similitude appuie

l'hypothèse que nos capacités arithmétiques sont issues d'une longue histoire évolutive. Les recherches en éthologie ont, par ailleurs, confirmé l'avantage évolutif qu'apporte la perception du nombre, qu'il s'agisse d'évaluer une quantité de nourriture ou la taille d'un groupe de congénères.

* Les familles qui souhaitent participer à une étude génétique sur la dyscalculie peuvent s'adresser à Madame Bajou, au SHF), bajou@shfj.cea.fr



jouer un rôle bien particulier dans le traitement des nombres. Dans certains cas, une lésion de la partie postéro-inférieure du lobe pariétal gauche peut même entraîner un « syndrome de Gerstmann* » complet, avec perte du sens des nombres mais aussi de l'espace, des doigts et de l'écriture. Or, chez l'enfant, il n'est pas rare que la dyscalculie s'accompagne en outre d'un syndrome de Gerstmann développemental. Un développement anormal du lobe pariétal, sous l'influence de facteurs génétiques ou environnementaux, pourrait donc être à l'origine de la dyscalculie de l'enfant. Ces mêmes facteurs pourraient aussi affecter d'autres circuits cérébraux, ce qui expliquerait l'association fréquente de la dyscalculie avec d'autres pathologies développementales.

Si la dyscalculie repose ainsi sur des fondements cérébraux, comment les observer ? Commençons par caractériser les régions du cerveau qui, chez l'adulte normal, sont impliquées dans le sens des nombres et dans le calcul mental. Les études en imagerie fonctionnelle montrent qu'un large

réseau impliquant le lobe frontal et le lobe pariétal est activé dans le calcul mental, opération complexe nécessitant la coordination entre des aires cérébrales impliquées dans la mémoire, l'attention et le langage [fig. 1].

Manipulation et mémorisation

Au sein de ce large réseau fonctionnel, nous avons émis l'hypothèse qu'il y aurait au moins deux systèmes cérébraux impliqués dans le calcul mental [9, 10] : l'un est non verbal, fondé sur le sens des nombres et la manipulation des quantités ; l'autre est verbal et fondé sur la mémorisation des calculs (additions simples et tables de multiplication), indépendamment de la perception des nombres. Nous pensons que le premier de ces systèmes, le plus fondamental, est à la base de nos capacités en arithmétique. En effet, le calcul n'a pas toujours besoin de la mémoire verbale : de nombreuses opérations, comme la soustraction ou la comparaison, demandent de manipuler des quantités sans faire appel pour autant à la mémorisation exhaustive d'une table. ⇒

[5] L. Levy *et al.*, *Neurology*, 53, 639, 1999.

[6] L. Cipolotti *et al.*, *Brain*, 114, 2619, 1991.

[7] Y. Takayama *et al.*, *Archives of Neurology*, 51, 286, 1994.

[8] C. Lemer *et al.*, *Neuropsychologia*, 41, 1942, 2003.

[9] S. Dehaene et L. Cohen, *Mathematical Cognition*, 1, 83, 1995.

[10] S. Dehaene *et al.*, *Science*, 284, 970, 1999.

Concevoir une rééducation par ordinateur

■ **LES PREMIERS RÉSULTATS OBTENUS AVEC UN LOGICIEL POUR TRAITER LA DYSLEXIE** sont encourageants [18]. C'est pourquoi nous nous sommes lancés dans un projet similaire pour tenter de rééduquer les enfants dyscalculiques âgés de 8 à 10 ans. Notre approche est fondée sur un entraînement intensif du sens élémentaire des quantités à l'aide d'un logiciel proche d'un jeu de l'oie. L'idée est de faire travailler les enfants directement sur les quantités, sans passer par le langage, à l'aide d'exercices de comparaison de nombres présentés sous un aspect ludique. La difficulté des exercices est modulée par des facteurs comme la distance, la taille ou le mode de présentation des nombres. Un algorithme adapte en permanence les exercices au niveau du joueur afin qu'il réussisse toujours dans 75 % des essais. Ainsi, l'enfant travaille à un niveau de difficulté optimal sans pour autant se décourager.

* **Le « syndrome de Gerstmann »** combine quatre symptômes : troubles de la reconnaissance des doigts, difficulté à identifier la droite et la gauche, maladresse dans l'écriture, et difficultés en arithmétique.

* **La spectroscopie par résonance magnétique** permet d'identifier la présence et l'abondance de molécules essentielles à la machinerie cellulaire telles que la choline, la créatine ou le N-acétyl-aspartate.

⇒ Le premier système de calcul fait principalement appel au sillon intrapariétal, une scissure qui s'insère en profondeur au sein du lobe pariétal [fig. 1]. Cette région s'active automatiquement dans les deux hémisphères pour toutes les tâches qui nécessitent une manipulation des quantités [11]. La présentation visuelle de chiffres à des sujets suffit d'ailleurs à entraîner une activité dans la région intrapariétale, de même que l'estimation numérique d'ensembles d'objets [12]. S'agit-il simplement du résultat de l'acquisition scolaire de l'arithmétique ? Non, car le même système se retrouve chez l'animal. En 2002, les neurobiologistes Andreas Nieder et Earl Miller, du MIT, ont identifié, dans le sillon intrapariétal du singe macaque, des neurones répondant sélectivement à certaines quantités d'objets, de 1 jusqu'à 5 [fig. 2] [13]. Ces travaux suggèrent que la région intrapariétale contient un code neuronal des quantités approximatives, qui serait un héritage de l'évolution. Cependant, alors que les neurones

des autres primates ne répondent qu'aux ensembles concrets d'objets, l'apprentissage du langage et de l'écriture permet à la région intrapariétale humaine de s'activer également par le biais de notations symboliques des nombres, par exemple les chiffres arabes. Elle fournit donc un sens quantitatif, une intuition numérique à des symboles, qui, sans cela, resteraient vides de sens. Sans doute l'arithmétique constitue-t-elle un domaine naturel de la pensée humaine, hérité des millions d'années d'évolution de notre cerveau dans un environnement dont le nombre constitue un paramètre essentiel. On comprend alors que la désorganisation précoce de ces circuits corticaux puisse conduire à une perte sélective du sens des nombres.

Les avancées de l'imagerie cérébrale permettent à présent de tester cette hypothèse en visualisant directement les désorganisations cérébrales liées à la dyscalculie. L'aspect macroscopique du tissu cérébral est le plus souvent normal, comme dans de nombreuses autres pathologies développementales. Cependant, ce résultat est trompeur. Le trouble se situe à une échelle microscopique invisible à l'œil nu. C'est ce qu'a observé Lucien Levy chez le patient J. S., ce jeune homme de 18 ans à la scolarité brillante en dépit d'une sévère dyscalculie. Alors que l'analyse en imagerie conventionnelle de l'anatomie cérébrale de J. S. semblait normale, une étude en spectroscopie par résonance magnétique* a pour la première fois montré des anomalies métaboliques dans la région pariétale inférieure gauche. Les résultats suggéraient ainsi une désorganisation anatomique des réseaux impliqués dans le calcul.

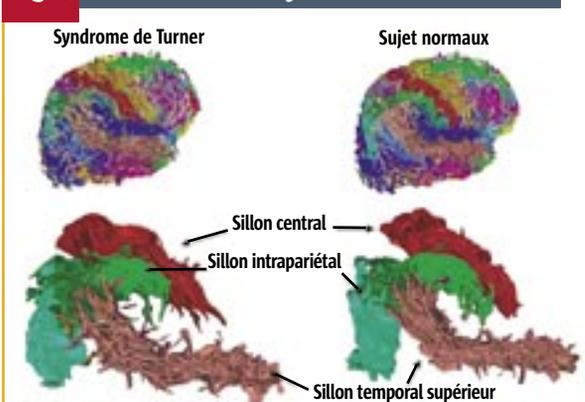
Diagnostic précoce

Une autre étude en imagerie par résonance magnétique a montré une réduction de la densité de matière grise dans la région pariétale inférieure gauche chez des enfants dyscalculiques nés prématurément, comparés à un groupe témoin d'enfants également nés prématurément mais ne présentant pas ce trouble [14].

Enfin, l'étude que nous avons menée en 2003 au SHFJ sur la dyscalculie associée au « syndrome de Turner » a montré une désorganisation anatomique du sillon intrapariétal, à droite cette fois [15]. Dans la mesure où les plissements corticaux se mettent en place au cours du troisième trimestre de la grossesse, cette désorganisation pourrait indiquer un trouble précoce du développement cérébral entre la vingt-huitième à la trentième semaine de gestation. Cette anomalie anatomique était associée à une modulation anormale de l'activité fonctionnelle dans ce sillon en fonction de la taille des nombres [fig. 3]. Chez le sujet normal, l'activation augmente avec la taille des nombres. Ce n'était pas le cas chez les patientes, et celles-ci présentaient un ralentissement particulier lorsque les calculs portaient sur des grands nombres.

Des anomalies fonctionnelles bilatérales du sillon intrapariétal ont également été trouvées dans une autre dyscalculie associée à une pathologie génétique, le syndrome de l'X fragile [16]. Ainsi, la région pariétale apparaît comme le dénominateur commun aux dyscalculies observées dans

Fig.3 Les effets du « syndrome de Turner »



CHEZ LES PATIENTES ATTEINTES d'un « syndrome de Turner* », on remarque, entre autres, une désorganisation du sillon intrapariétal droit (zone verte dans l'éclaté du cerveau, en bas). Cela suggère un trouble du développement cérébral du fœtus vers la fin de la grossesse, quand les plissements corticaux se mettent en place.

© UNITÉ DE NEUROIMAGES COGNITIVES/INCEM+CEA

[11] S. Dehaene et al., *Cognitive Neuropsychology*, 20, 487, 2003.

[12] E. Eger et al., *Neuron*, 37, 719, 2003.

[13] A. Nieder et al., *Science*, 297, 1708, 2002.

[14] E. Isaacs et al., *Brain*, 124, 1701, 2001.

[15] N. Molko et al., *Neuron*, 40, 847, 2003.

[16] S. Rivera et al., *Hum. Brain Mapp*, 16, 206, 2002.

[17] S. Dehaene et al., *Trends in Neuroscience*, 21, 355, 1998.

[18] E. Temple et al., *PNAS*, 100, 2860, 2003.

une grande variété de pathologies développementales. Les anomalies se retrouvent le plus souvent dans l'hémisphère gauche, mais parfois aussi dans l'hémisphère droit, sans que nous sachions pour l'instant expliquer ces variations de latéralisation.

Ces premiers travaux confortent l'idée que la dyscalculie, chez de nombreux enfants, puisse être liée à une cause primaire, la perte du sens des nombres. Nous pensons pouvoir montrer que la région pariétale s'active dès la première année de vie, et que sa désorganisation pourrait donc se diagnostiquer très précocement (lire « Le sens des nombres, un avantage évolutif? », p. 45).

Mais la plasticité du cerveau de l'enfant étant considérable, il n'y a pas de raison de penser que la dyscalculie soit irrémédiable. En fait, il devrait être possible de rééduquer les enfants dyscalculiques en développant leur sens élémentaire des quantités numériques. Nous comptons y parvenir par le biais d'un jeu informatisé (lire ci-contre « Concevoir une rééducation par ordinateur »). L'imagerie cérébrale devrait permettre de vérifier si, avec une telle rééducation, on parvient à rétablir tout ou partie des fonctions normales du sillon intrapariétal. ■■

S. D., N. M. et A. W.

7 2. Compter sur les doigts, une étape nécessaire !



Dans la plupart des sociétés, les enfants, et parfois même les adultes, utilisent leurs doigts pour compter. Mais est-ce une étape indispensable? Les études les plus récentes sur la question semblent confirmer un lien entre l'utilisation des doigts et les performances en arithmétique.

Le neuropsychologue britannique Brian Butterworth a montré que les enfants sont loin d'être tous égaux dans leur manière d'appréhender l'arithmétique. Sans pour autant être dyscalculiques (lire l'article p. 42), certains réussissent moins bien que d'autres lorsqu'ils apprennent à compter vers l'âge de 4 ou 5 ans. Ainsi, des enfants ne présentant aucun trouble du langage, ni de la logique, se trompent pour dénombrer des collections d'objets en les pointant avec leur ⇒

Michel Fayol,
professeur des universités,
dirige le laboratoire
de psychologie sociale
de la cognition, université
Blaise-Pascal de Clermont-
Ferrand et CNRS.
Michel.Fayol
@srvpsy.univ-bpclermont.fr

**Catherine
Marinthe,**
médecin et docteur
en psychologie
de l'université Blaise-Pascal.

Pierre Barrouillet,
professeur des universités,
travaille au laboratoire
d'études de l'apprentissage
et du développement,
université de Bourgogne
et CNRS.

⇒ doigt : par exemple, ils comptent 23 jetons alors qu'il y en a 25. En étudiant ce trouble, nous avons pensé qu'il pourrait venir d'une perturbation dans l'utilisation des doigts pour compter. D'où notre hypothèse que compter sur les doigts serait une étape nécessaire pour apprendre à calculer. Mais comment le prouver ?

Dans beaucoup de cultures, les enfants recourent aux doigts pour effectuer certaines opérations : montrer une quantité, additionner, déterminer le nombre de jours séparant deux dates, etc. Toutefois, les conventions qui régissent leur utilisation peuvent varier d'un pays à l'autre : pour compter, les Japonais démarrent la main ouverte et abaissent les doigts, alors que les Occidentaux et les Chinois font l'inverse.

Reconnaître ses doigts

On constate que, vers l'âge de 2-3 ans, les enfants lèvent et abaissent les doigts pour simuler l'ajout ou le retrait d'éléments. Il ne semble pas qu'on leur ait enseigné à le faire. Peut-être ont-ils observé et imité les adultes qui les entourent. Cette utilisation des doigts pour compter ne se manifesterait-elle que temporairement, et sans qu'elle soit indispensable ? Les données recueillies sur certaines pathologies au cours du XX^e siècle laissent à penser qu'il n'en est rien : ceux qui ne parviennent pas à se représenter leurs doigts présentent des troubles du calcul plus ou moins graves.

En 1924, le neurologue Josef Gerstmann décrit pour la

première fois chez une patiente de 52 ans un syndrome associant quatre symptômes : troubles de la reconnaissance des doigts (agnosie digitale) ; difficultés à identifier la droite et la gauche, et à les distinguer ; maladresse dans le tracé des lettres et des mots ; et troubles ou pertes de certaines habiletés arithmétiques, par exemple aligner les chiffres en colonnes, soustraire et diviser [1].

Représentation mentale

Plus récemment, des troubles affectant à la fois la perception tactile et les habiletés arithmétiques ont été décrits chez l'enfant ou l'adolescent. En 1963, les neuropsychologues Marcel Kinsbourne et Elizabeth Warrington rapportent 7 cas d'enfants nés avec une agnosie digitale : ils avaient tous de grandes difficultés à se représenter la plupart des concepts numériques et à résoudre des additions ou des soustractions simples. L'acquisition des capacités numériques serait donc perturbée lorsque les représentations mentales des doigts ne se développent pas normalement. D'autres travaux ont montré que certains enfants présentant des difficultés dans l'apprentissage du calcul manifestaient par ailleurs des troubles perceptivo-tactiles, notamment des difficultés à reconnaître leurs doigts [2, 3]. Il existerait donc une liaison fonctionnelle entre représentations mentales des doigts et des nombres. Mais quelle est la cause et quel est l'effet ?

Selon nous, c'est un déficit dans les compétences

APPRENTISSAGE

Une capacité de calcul non verbale ?

LES ENFANTS N'ARRIVENT PAS À ASSOCIER LES NOMS DES NOMBRES À LEUR CARDINALITÉ AVANT L'ÂGE DE 3 ANS. Pourtant, les recherches portant sur les bébés ont montré que, vers 6 mois, ceux-ci peuvent déjà différencier les petites quantités, de 1 jusqu'à 3, et évaluer approximativement les grandes : deux psychologues américains, Fei Xu, de l'université de Colombie britannique, et Elizabeth Spelke, de l'université d'Harvard, ont même montré qu'ils pouvaient différencier 8 de 16 ou 16 de 32, mais pas 8 de 12. On pouvait donc s'attendre que vers 18 mois l'acquisition de la numération verbale la plus élémentaire (associer les mots « un », « deux » et « trois » aux quantités correspondantes) s'effectue très rapidement.

Or, c'est vers la fin de la deuxième année, parfois plus, que les enfants parviennent à apprendre ces associations et commencent à les utiliser. Pourquoi ? La numération verbale

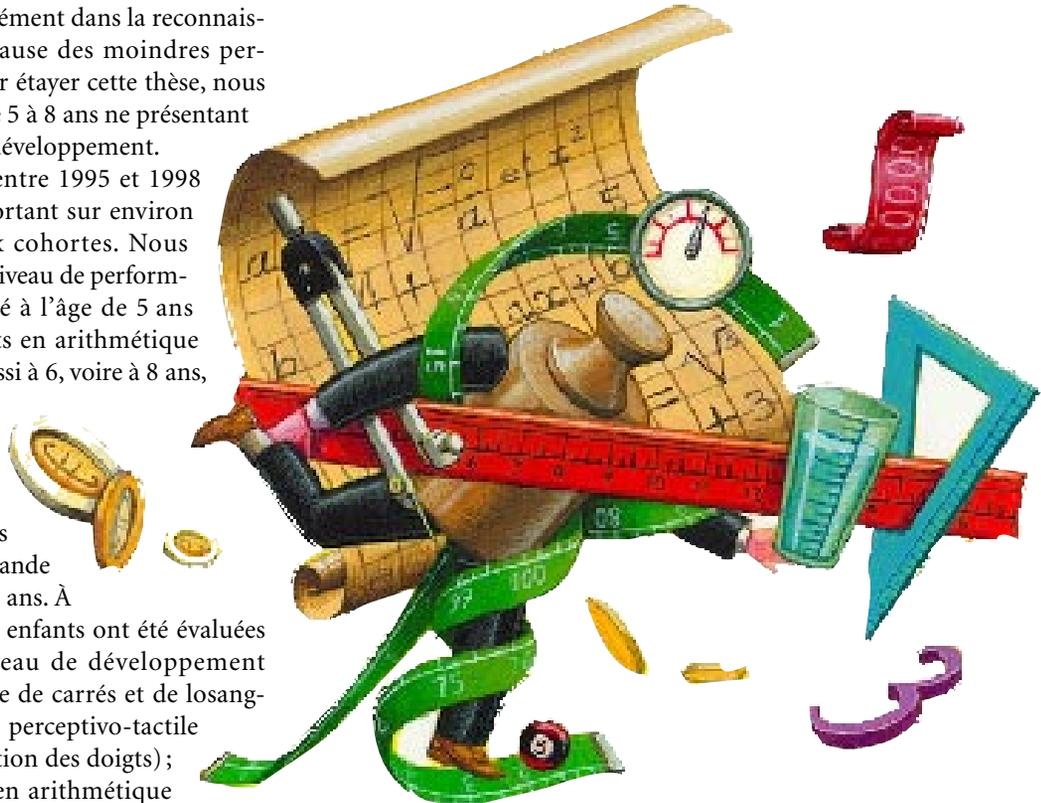
pour désigner des quantités ne va pas de soi. En effet, les noms de nombres n'évoquent pas en eux-mêmes leur cardinalité : rien n'indique dans le mot « cinq » qu'il renvoie à une quantité supérieure à « quatre ». Cela constitue sans doute le problème majeur auquel se trouvent confrontés les enfants.

En outre, jusqu'à l'âge de 5 ans, les problèmes simples d'addition et de soustraction sont mieux et plus précocement résolus quand ils sont présentés sous forme non verbale. La psychologue Nancy Jordan, de l'université du Delaware, et ses collaborateurs ont montré que des enfants de 4 ans étaient en mesure de résoudre des additions et des soustractions présentées sous forme non verbale. Ainsi, lors d'une expérience, des enfants réussissent à imiter un expérimentateur qui additionne des objets devant eux en prenant 3 jetons, puis 2, et en les dissimulant ensuite derrière un écran. En revanche, les mêmes enfants échouent si on

leur présente ces opérations avec un énoncé, que ce soit sous la forme d'une histoire, de nombres d'objets à ajouter, ou simplement d'opérations abstraites [5, 6]. À partir de 5 ans, quel que soit le mode de présentation, les performances deviennent comparables. Les enfants manipuleraient donc mentalement des représentations discrètes précises des quantités avant d'associer des noms aux nombres.

Compter sur les doigts pourrait jouer un rôle fondamental lors de cette phase non verbale de l'apprentissage du calcul. Car les doigts permettent une certaine abstraction : ils peuvent représenter aussi bien des objets que des personnages ou des événements. Ils permettent d'établir une analogie entre ce qu'ils représentent et les quantités. Enfin, ils servent à manipuler ces quantités, ce qui prélude à la compréhension des opérations arithmétiques.

perceptivo-tactiles, plus précisément dans la reconnaissance des doigts, qui est la cause des moindres performances arithmétiques. Pour étayer cette thèse, nous voulions étudier des enfants de 5 à 8 ans ne présentant pas de trouble particulier du développement. Notre laboratoire a conduit entre 1995 et 1998 deux études longitudinales portant sur environ 300 enfants répartis en deux cohortes. Nous avons réussi à montrer que le niveau de performance perceptivo-tactile évalué à l'âge de 5 ans permet de prédire les résultats en arithmétique non seulement à 5 ans mais aussi à 6, voire à 8 ans, mieux que ne le fait le niveau de développement général. Une cohorte a été suivie de la grande section de maternelle (5 ans) à la fin du cours préparatoire, et l'autre, de la grande section de maternelle jusqu'à 8 ans. À 5 ans, les performances de ces enfants ont été évaluées dans trois domaines: le niveau de développement (dessin de bonshommes, copie de carrés et de losanges); le niveau de performance perceptivo-tactile (reconnaissance et discrimination des doigts); et le niveau de performance en arithmétique (écriture de chiffres, dénombrement de collections, résolution de problèmes simples).



Entraînement digital

En fin de cours préparatoire, ces mêmes enfants ont eu à compléter une autre série d'épreuves arithmétiques: écriture de nombres sous dictée, résolution d'opérations présentées oralement, résolution de petits problèmes. Enfin, en début de cours élémentaire deuxième année, un sous-groupe d'environ 120 enfants a été soumis à nouveau à deux catégories d'épreuves, l'une de développement (des exercices sur le raisonnement non verbal, par exemple compléter des suites de formes géométriques), l'autre d'arithmétique (opérations à résoudre posées en colonnes, problèmes avec des additions ou des soustractions, écriture de nombres). Résultat: le score aux épreuves perceptivo-tactiles à l'âge de 5 ans prédisait mieux que le niveau de développement au même âge les performances en arithmétique à 5 et à 6 ans [4]. Cela restait vrai pour la réussite des enfants de 8 ans à des activités de calcul mental et de

résolution de problèmes. Toutefois, à 8 ans, les résultats aux opérations et aux épreuves de numération faisant appel à la mémoire verbale étaient mieux prédits par le niveau de développement à cet âge que par les performances perceptivo-tactiles.

Cela conforte notre hypothèse. Pour la valider totalement, nous avons prévu de conduire une étude auprès de 500 enfants âgés de 5 ans. Nous allons les entraîner systématiquement à manipuler leurs doigts, non pour compter mais simplement pour qu'ils soient plus déliés. Puis nous vérifierons si cet entraînement a bien un impact positif sur leurs performances ultérieures en arithmétique. Ce sera alors une preuve concrète que l'utilisation des doigts est effectivement une étape préalable utile à l'apprentissage du calcul. Et cela corroborerait (lire ci-contre « Une capacité de calcul non verbale? ») l'existence d'un stade non verbal du calcul. ■■

M. F., C. M. et P. B.

Illustrations: Sergio Aquindo

POUR EN SAVOIR PLUS

- B. Butterworth, *The Mathematical Brain*, Macmillan, 1999.
- S. Dehaene, *La Bosse des maths*, Odile Jacob, 1997.
- <http://math.nmi.jyu.fi/numbra/>
- K. Fuson, *Children's Counting and*

- Concepts of Number*, Springer Verlag, 1988.
- M. Pesenti et X. Seron, *La Neuropsychologie du calcul*, Solal, 2000.
- J. Bideaud et H. Lehalle, *Le Développement des activités numériques*, Hermès, 2002.

- R. Brissiaud, *Comment les enfants apprennent à calculer*, Retz, 2003.
- A. Van Hout et C. Meljac, *Les Dyscalculies*, Masson, 2001.
- J. Campbell, *Handbook of Numerical Cognition*, LEA, à paraître.

[1] J. Gerstmann, *Arch. of Neurol. and Psych.*, 44, 398, 1930.

[2] M. Kinsbourne et E. Warrington, *Arch. Neurol.*, 8, 490, 1963.

[3] M. Kinsbourne et E. Warrington, *Brain*, 85, 47, 1962.

[4] M. Fayol *et al.*, *Cognition*, 68, 63, 1998.

[5] J. Huttenlocher *et al.*, *J. Exp. Child Psych.*, 123, 284, 1994.

[6] N. Jordan *et al.*, *Dev. Psych.*, 28, 644, 1992.