

Les sciences cognitives : mieux comprendre le cerveau en développement

G. Dehaene-Lambertz, laboratoire de sciences
cognitives et psycholinguistique,
CNRS, UMR 8554,
et service de neuropédiatrie, CHU Bicêtre

SCIENCES COGNITIVES

Pour certains, cognition et sciences cognitives ne représentent que les derniers termes à la mode pour parler de fonctions cérébrales et de psychologie. Pour d'autres, les sciences cognitives sont une entreprise déshumanisante et totalitaire dont l'objectif est de réduire l'homme à une machine.

Le but de cet article est de présenter la démarche suivie par les sciences cognitives et de montrer en quoi cette démarche analytique associée aux progrès de l'imagerie cérébrale devrait nous permettre de mieux comprendre le cerveau, et notamment le cerveau en développement.

Un nouveau courant s'est dégagé ces dernières années au sein de la psychologie : les sciences cognitives. Le but de ce courant est d'étudier les fonctions cérébrales et leur substrat matériel, le cerveau, comme un objet scientifique externe, sans se fonder sur l'introspection personnelle ou l'analyse de l'histoire du sujet. Il ne s'agit pas de nier l'importance de la subjectivité humaine, des différences individuelles ou de l'histoire de chacun dans le comportement, mais le postulat des sciences cognitives est que ces informations n'entrent pas dans le champ scientifique et ne sont donc pas exploitables pour comprendre le fonctionnement cérébral. S'appuyant sur la psychologie expérimentale, les sciences cognitives favorisent une approche analytique et biologique du fonctionnement cérébral.

Le postulat principal des sciences cognitives est que le fonctionnement cérébral, depuis des fonctions simples comme la réponse à une barre placée dans le champ visuel, jusqu'à des fonctions cognitives complexes, comme le langage ou la conscience, peut être étudié et décrit en étapes de traitement ou calcul de représentations. Par exemple, le langage peut être défini, comme le fait le Petit Larousse, comme « une faculté propre à l'homme d'exprimer sa pensée au moyen d'un système structuré de signes ». La trop grande généralité de cette définition rend difficile de comprendre comment le cerveau perçoit et produit du langage, mais on peut aussi voir le langage comme une succession

d'étapes (pour la perception de la parole : décodage acoustique, représentation phonétique, accès lexical, calcul syntaxique, représentation sémantique, mise en contexte) qui peuvent être analysées séparément. On voit bien l'impact de l'intelligence artificielle sur cette démarche analytique qui a pour but de réduire une performance complexe en une succession de calculs plus élémentaires. Mais les sciences cognitives s'éloignent de l'intelligence artificielle en ce sens qu'elles cherchent une plausibilité biologique aux processus décrits et s'appuient sur des données expérimentales acquises chez les sujets normaux et les patients pour découvrir non pas les étapes de calcul les plus efficaces pour résoudre un problème mais celles réellement réalisées dans le cerveau. Par exemple, pour calculer $2 + 3$, la calculatrice convertira les deux chiffres en un code binaire qui sera additionné. Pour une calculatrice, $126 + 38$ n'est pas plus difficile à calculer que $2 + 3$. Le cerveau, lui, dispose de deux moyens, soit il réactive l'association verbale mémorisée à l'école « 2 et 3 font 5 », soit il active la représentation numérique de 2 puis celle de 3, additionne ces deux représentations numériques puis reconvertit cette quantité en son symbole verbal « cinq ». Contrairement à la machine, $126 + 38$ lui demandera beaucoup plus de peine que $2 + 3$, car il n'a pas appris cette association verbale particulière, et sa représentation numérique pour les grands chiffres est beaucoup plus imprécise que pour les petits chiffres. Le cerveau n'est donc pas un

ordinateur. Il obéit à des lois propres, fruit de son héritage biologique et évolutif, que les sciences cognitives essayent d'appréhender.

Pour comprendre nos facultés cérébrales, les sciences cognitives s'appuient sur quatre méthodes : la neuropsychologie, la psychologie expérimentale avec calcul de temps de réaction, l'imagerie cérébrale et la modélisation informatique.

QUAND LA BOÎTE EST CASSÉE...

La neuropsychologie est sans doute la méthode la plus ancienne pour étudier la relation entre psychique et cerveau. Broca et Déjerine au 19^e siècle et bien d'autres depuis ont permis de mettre en relation les déficits présentés par les patients et le siège de la lésion cérébrale, et donc d'inférer quelles sont les régions cérébrales cruciales dans telle ou telle fonction cognitive. L'analyse des dissociations entre déficits et préservation de fonctions cérébrales chez les patients a permis des descriptions de plus en plus fines des procédures de traitement cérébral [1]. Par exemple, certains patients ne peuvent plus faire des multiplications, mais peuvent encore comparer deux nombres. D'autres, à l'inverse, connaissent encore leurs tables de multiplication, mais répondent « 6 » quand on leur demande quel est le chiffre entre 2 et 4. Le premier cas survient le plus souvent à la suite de lésions des régions linguistiques de l'hémisphère gauche. Les patients ont perdu toutes les chaînes d'association verbale et en particulier les tables de multiplication. Par contre, ils peuvent toujours accéder aux représentations numériques situées dans le sillon pariétal inférieur. Le deuxième cas de dyscalculie est beaucoup plus rare, car il est dû à des lésions bilatérales des lobes pariétaux. Dans ce cas, les patients connaissent toujours leurs tables, mais n'ont plus aucune intuition sur les nombres et sur ce que peuvent représenter les symboles 2 et 4. La réponse « 6 » est due à l'association

verbale « 2, 4, 6... ». Ces dissociations dans les performances au sein du même domaine de l'arithmétique ont fait postuler que pour effectuer des opérations numériques nous pouvions utiliser deux systèmes partiellement indépendants : l'un verbal, reposant sur l'hémisphère gauche ; l'autre basé sur la représentation des quantités, situé dans les régions pariétales inférieures [2].

LES SUJETS NORMAUX NE SONT PAS TOUJOURS PERFORMANTS...

La psychologie expérimentale essaye de déterminer chez des sujets normaux quelles sont les caractéristiques des étapes de traitement que suit un stimulus, grâce le plus souvent à la mesure de temps de réaction. Ainsi, lors de tâches de comparaison de nombres (dire par exemple si 60 est plus grand ou plus petit que 55), on observe que les sujets répondent plus lentement pour les nombres proches de la cible que pour les nombres lointains. Il est ainsi beaucoup plus facile de répondre pour 5, que pour 49, que ce nombre est plus petit que 55. La réponse à 45 est également plus rapide que celle à 49. Pourtant, le sujet pourrait ne tenir compte dans les deux cas que du seul premier chiffre « 4 », qui signale immédiatement que le nombre est plus petit que 55. Ce ralentissement de plus en plus important au fur et à mesure que le nombre à comparer est proche du nombre cible ne tient aucun compte de la notation (chiffres arabes ou mots), mais dépend uniquement de la distance entre le nombre à comparer et la cible. Les psychologues ont donc proposé que la représentation numérique était analogique et non pas symbolique, et que la perception du symbole visuel activait automatiquement la représentation des quantités associée au symbole. Sur l'échelle des quantités, le premier chiffre « 4 » de « 45 » et de « 49 » n'est plus accessible, seule la quantité correspondant à ces deux nombres est représentée. Celle-ci est proche de « 55 » et

donc plus difficile à distinguer que la quantité associée au symbole « 5 ». Les sujets sont donc plus lents pour les nombres à comparer proches de la cible que pour les nombres plus distants [3]. Un autre exemple fameux de résultats obtenus en psychologie expérimentale est l'effet de Stroop. Dans cette tâche, le sujet doit nommer la couleur de l'encre avec laquelle le mot est imprimé sans tenir compte du sens du mot. Par exemple dire rouge pour le mot « vert » ou le mot « chat ». Les sujets sont considérablement ralentis pour le mot « vert », car il existe une interférence entre la couleur de l'encre et le sens du mot. Les enfants en début d'apprentissage de la lecture ou les adultes mauvais lecteurs n'ont pas ou peu d'effet Stroop, car l'accès au sens du mot écrit se fait trop lentement pour interférer avec l'identification de la couleur de l'encre [4]. Dans cet exemple, on voit bien que la réponse à la tâche ne nécessite pas d'accéder au sens du mot, et pourtant cet accès se fait automatiquement et vient gêner la réponse. De même comparer deux nombres pourrait se faire sur la base du premier chiffre, et pourtant c'est la quantité représentée par les deux chiffres qui est activée. Le but de la psychologie expérimentale est donc de manipuler les conditions expérimentales pour déterminer quelles sont les étapes de traitement que parcourt le stimulus et quelle est la nature des représentations accédées successivement.

OÙ ET QUAND DANS LE CERVEAU ?

L'imagerie cérébrale s'est considérablement développée ces dernières années, et les données acquises chez les sujets normaux viennent compléter les données de localisation cérébrale acquises chez les patients. Deux types de méthodes sont utilisées. Les méthodes à haute résolution temporelle, potentiels évoqués électriques (PE) et magnéto-encéphalographie (MEG), et les méthodes à haute résolution spatiale, imagerie par résonance magnétique fonc-

tionnelle (IRMf) et tomographie par émission de positons (TEP).

Issus des techniques électroencéphalographiques, les PE consistent en l'enregistrement de l'activité électrique du cerveau au niveau du scalp après un événement sensoriel. Le moyennage du signal électrique lors des présentations successives du stimulus permet d'extraire de l'activité cérébrale de fond la séquence des événements électriques liée au traitement du stimulus. Il est alors théoriquement possible d'en déduire les procédures de traitement du stimulus et éventuellement les régions cérébrales impliquées dans chacune de ces étapes. Alors que les PE utilisés habituellement en clinique se limitent à l'exploration des premiers relais sensoriels et étudient des réponses de l'ordre de la dizaine de millisecondes (ms), les PE utilisés en recherche concernent des réponses pouvant aller jusqu'à une seconde, et reflètent donc des procédures de traitement plus complexes, pouvant aller jusqu'à la détection consciente d'un stimulus et à la prise de décision. Du fait de leur résolution temporelle, de l'ordre de la milliseconde, les PE permettent de déterminer les latences des étapes de traitement, latences qui peuvent être comparées à travers différentes populations. L'utilisation d'un grand nombre d'électrodes sur le scalp (nous en utilisons 65 chez l'enfant et 128 chez l'adulte dans notre système d'enregistrement) permet d'augmenter leur résolution spatiale. En effet, l'un des reproches essentiels faits à cette technique est qu'il est difficile de localiser précisément la ou les sources à l'origine du voltage recueilli en surface, et donc de localiser les régions cérébrales actives à un moment donné. Effectivement, le voltage en surface correspond à la résultante de tous les dipôles électriques actifs à un moment donné. Comme le nombre de ces dipôles est a priori inconnu, on se trouve confronté à une multitude de solutions pouvant modéliser le voltage de surface. C'est ce qui est appelé le problème inverse. Néanmoins, les données obtenues avec d'autres techniques d'imagerie, comme l'imagerie

par résonance magnétique fonctionnelle, et les données neuropsychologiques permettent de réduire le nombre de solutions vraisemblables.

La magnéto-encéphalographie est une technique très proche des PE. Ce qui est mesuré n'est plus un champ électrique, mais le champ magnétique créé par tout courant électrique et donc ici par l'activation neuronale. Ce champ magnétique est très faible (de l'ordre de 100 femto tesla) et nécessite que la machine de magnéto-encéphalographie soit strictement isolée de toutes les sources de champ magnétique de notre environnement. Les informations spatiales sont plus précises qu'en PE, car le champ magnétique diffuse moins loin que le champ électrique (voir [5] pour une description plus complète de ces techniques).

Quelles informations sur le fonctionnement cérébral peut apporter ce type de techniques ? Reprenons la tâche de comparaison de nombres, en utilisant des nombres écrits soit en chiffres arabes, soit en toutes lettres [6]. A 150 ms après l'apparition du stimulus visuel, une négativité apparaît sur l'arrière de la tête, bilatérale pour les chiffres arabes et très latéralisée à gauche pour les nombres en lettres. Puis vers 190 ms, l'accès au sens se fait avec une réponse très similaire pour les deux types de stimulus, chiffres et mots. Comme dans les réponses comportementales, les nombres les plus proches de la cible sont les plus difficiles à traiter, engendrant un potentiel de plus forte amplitude que les nombres plus lointains. La réponse est maximale dans les régions pariétales et identique, que les nombres soient notés en chiffres arabes ou en lettres, confirmant que la réponse à ce niveau ne dépend plus de la notation mais uniquement de la quantité représentée. Puis une réponse motrice est programmée par le sujet, ce qui se traduit par une négativité vers 330 ms sur les régions précentrales de l'hémisphère controlatéral à la réponse. Enfin, si le sujet s'aperçoit qu'il a fait une erreur de réponse, une forte négativité survient sur les régions frontales. On voit dans cet exemple comment les PE permettent

de décomposer un comportement en une suite d'étapes de traitement dont on peut déterminer la latence et la localisation cérébrale.

Néanmoins, avec les PE, la localisation des réponses ne peut être que supposée. Seules les méthodes d'imagerie spatiale permettront de déterminer avec précision les aires cérébrales activées. La méthode actuellement la plus employée est l'IRMf : elle est non invasive et la superposition des images d'activation et des images anatomiques acquises en succession permet une visualisation très précise des régions activées. La méthode la plus utilisée en IRMf est basée sur la réponse BOLD (blood oxygen level dependent contrast). L'activation neuronale entraîne une réponse hémodynamique se traduisant par un apport d'oxygène dans la région activée. Le taux de désoxyhémoglobine, qui possède des propriétés paramagnétiques du fait de l'existence d'électrons libres célibataires, se trouve alors abaissé en raison de l'augmentation du débit sanguin saturé en oxygène. Il en résulte, dans cette région, une remontée du signal qui peut être détectée. Cette remontée du signal est lente et demande environ 6 s pour atteindre son maximum. C'est pourquoi la sensibilité temporelle de l'IRMf est médiocre. Par contre, la superposition des images fonctionnelles avec l'IRM anatomique acquise au cours de la même séance permet d'identifier parfaitement les régions cérébrales impliquées dans une tâche cognitive (voir [7] pour une description plus complète des principes de l'IRMf).

Les études en caméra à émission de positons (TEP) sont de moins en moins utilisées chez le sujet normal, car elles dépendent de l'injection de faibles doses de produits radioactifs. Ces études sont donc actuellement réservées à certains neurotransmetteurs, comme la dopamine, ou à des substances pharmacologiques. Dans beaucoup d'études, les activations identifiées en IRMf ou en TEP ont confirmé chez l'adulte normal ce que les études neuropsychologiques avaient permis de supposer. Néanmoins, on ne peut réduire l'imagerie cérébrale à

une simple méthode de confirmation d'hypothèses. Elle a soulevé des questions intéressantes et éclairé certains déficits surprenants. Par exemple, alors que les études de patients aphasiques avaient révélé le rôle primordial de l'hémisphère gauche dans le traitement du langage et amené à considérer l'hémisphère droit comme un hémisphère muet, les études en IRMf ont permis de réévaluer le rôle de l'hémisphère droit dans le langage. Le fait qu'après une lésion cérébrale des sujets bilingues peuvent perdre l'une ou les deux langues qu'ils connaissaient, sans systématisation claire, a souvent étonné les neuropsychologues [8]. L'IRMf montre que les régions activées par la langue maternelle sont très reproductibles d'un sujet à l'autre et sont situées dans l'hémisphère gauche, alors que les régions activées par la deuxième langue sont très variables et beaucoup plus bilatérales, voire uniquement droites chez certains sujets [9]. Ces études en IRMf montrent donc que l'hémisphère droit n'est pas aussi « muet » que le supposaient les études neuropsychologiques, voire peut assurer chez certaines personnes le traitement linguistique complet d'une langue. Pourquoi la langue maternelle est-elle traitée à gauche et pourquoi l'hémisphère droit ne peut-il pas assurer une récupération correcte après lésion gauche deviennent désormais les questions à résoudre.

LES MODÈLES INFORMATIQUES

La modélisation informatique est la dernière approche utilisée pour comprendre les fonctions cognitives. A partir des données obtenues par les autres méthodes, les théoriciens essaient de programmer des « réseaux de neurones » virtuels qui présentent le même comportement. Les réseaux de neurones sont surtout utilisés pour comprendre l'apprentissage ou pour modéliser les conséquences des lésions cérébrales. Par exemple, comment se fait l'identification des mots ? Pour McClel-

land et Elman [10], la perception d'un phonème active tous les mots du lexique commençant par ce phonème, puis cette cohorte initiale se réduit au fur et à mesure de l'identification des phonèmes suivants, jusqu'au moment où il n'y a plus qu'un seul mot du lexique qui peut correspondre à la suite de phonèmes identifiés. Ce modèle prédit donc que la vitesse à laquelle on identifie un mot dépend non pas de sa longueur mais de son point d'unicité, c'est-à-dire du point où il n'y a plus qu'un seul mot possible dans le lexique correspondant à la suite des phonèmes entendus. Cette stratégie peut tout à fait être apprise par un réseau de neurones virtuels, et ce modèle a donné lieu à de nombreuses études chez l'adulte normal, qui ont confirmé la plupart des prédictions obtenues par la simulation informatique.

ET L'ENFANT...

On voit l'intérêt de l'approche cognitive pour étudier le développement cognitif de l'enfant. La complexité cérébrale est impossible à appréhender dans son ensemble. Mais comprendre le calcul des représentations phonologiques est un phénomène plus réduit que d'aborder le langage dans sa complexité, et il devient possible d'en cerner les bases biologiques, d'en suivre les modifications au cours du développement et de l'apprentissage, et d'en repérer les déficits éventuels. Depuis les années 70, les chercheurs en sciences cognitives se sont donc penchés sur l'enfant. Mais ils se heurtent à plusieurs difficultés qui rendent les études chez l'enfant plus complexes à mettre en œuvre que chez l'adulte. La première est que les adultes sont étudiés à un état stable. Tout adulte normal, qui a suivi une scolarité de base, domine sa langue maternelle, connaît l'arithmétique, sait lire, etc. Les connaissances d'un enfant dépendent de son âge et peuvent de plus être très variables au sein de la même tranche d'âge. Cela a considérablement handicapé la recherche en neuropsychologie de l'enfant. En outre, les déficits de l'en-

fant sont moins faciles à modéliser que ceux de l'adulte, car soit des procédures redondantes chez l'adulte peuvent être absolument nécessaires chez l'enfant lors de l'apprentissage, soit des notions doivent être acquises dans un certain ordre pour permettre l'apprentissage. Par exemple, si après une lésion cérébrale ou un trouble développemental, un enfant de sept ans ne peut plus ou ne sait pas calculer, quelle en est la cause ? Nous avons vu que, chez l'adulte, deux types de lésions peuvent donner des dyscalculies de type différent, l'une due à une mauvaise représentation des quantités et l'autre à un déficit dans les associations verbales gênant l'apprentissage et le rappel des tables de multiplication par exemple. Mais comment apprendre des tables de multiplication si les nombres n'évoquent rien ? La difficulté d'apprentissage de ces associations verbales pourrait donc être liée non seulement à des difficultés linguistiques, comme chez l'adulte, mais également à un manque du « sens du nombre ». Déterminer où se trouve la cause du trouble demande donc une analyse fine du déficit et une modélisation dynamique de l'apprentissage à partir de ce que nous savons de l'état stable chez l'adulte et de l'acquisition normale chez l'enfant. Enfin, la plupart des lésions étudiées chez l'adulte sont d'origine ischémique, lésant un territoire cérébral déterminé. Cela est moins vrai chez l'enfant, où les causes de lésions sont beaucoup plus disparates : anoxie, accident traumatique, infections, qui peuvent léser de multiples régions cérébrales même si la lésion principale semble localisée. Lésions diffuses ou multiples peuvent toucher différents réseaux neuronaux et donc donner des déficits combinés, difficilement modélisables. L'ensemble de ces raisons explique qu'il n'y ait pas eu chez l'enfant la même richesse productive des études neuropsychologiques que chez l'adulte. Une deuxième difficulté des études chez l'enfant est d'arriver à produire une situation expérimentale où l'enfant pourra montrer ses capacités réelles. Un exemple fameux de l'influence de la

compréhension de la situation expérimentale par l'enfant sur ses performances est celui de la conservation du nombre. Piaget [11] a montré que lorsqu'on dispose devant des enfants de quatre-cinq ans une série de 6 verres et de 6 bouteilles face à face et qu'on leur demande s'il y a plus de verres ou plus de bouteilles, ou le même nombre de verres et de bouteilles, les enfants répondent qu'il y a la même chose. Mais si on écarte les bouteilles, rendant cette ligne plus longue que celle des verres, les enfants répondent qu'il y a plus de bouteilles. Mehler et Bever [12] ont repris cette expérience en remplaçant bouteilles et verres par des billes. Les billes sont disposées sur deux rangées. Sur l'une, il y a 4 billes très écartées et sur l'autre 6 billes très rapprochées, la ligne de 6 étant plus courte que la ligne de 4. Lorsqu'on demande aux enfants de trois-quatre ans quelle est la ligne avec le plus de billes, ils montrent la rangée de 4, la plus longue. Mais si on remplace les billes par des bonbons et qu'on leur demande, non plus quelle est la rangée avec le plus de billes, mais celle qu'ils veulent manger, les enfants choisissent celle de 6, même si elle est plus courte. La différence de comportement dans les deux situations ne tient donc pas aux compétences numériques des enfants mais à ce qu'ils comprennent de la situation expérimentale et de ce que veut leur faire faire l'adulte. Les difficultés de conception d'une expérience sont encore plus grandes chez le nourrisson où la seule situation expérimentale doit susciter chez le nourrisson la réponse attendue. Les paradigmes les plus utilisés sont l'habituation-déshabituement d'une réponse comportementale comme la succion ou la fixation oculaire. Le nourrisson fixe par exemple une image où sont présentés quatre objets. Dès qu'il ne regarde plus l'image, l'expérimentateur, qui observe l'enfant par un œilleton caché au-dessus de l'image, relâche le bouton-réponse relié à un ordinateur. L'ordinateur calcule le temps de fixation et présente une seconde image comportant quatre nouveaux objets. Cette opération se répète jusqu'à ce que

l'enfant ne soit plus intéressé par les images, par exemple s'il ne regarde plus qu'un tiers du temps de fixation maximal. On présente alors une image avec huit objets. Si l'enfant regarde longuement à nouveau, on en déduit que huit objets est un élément nouveau qui réveille l'intérêt de l'enfant et qu'il peut donc faire la différence entre quatre et huit. Bien sûr, de nombreux contrôles sont faits pour s'assurer que c'est bien la différence entre quatre et huit qui fait réagir l'enfant. Par exemple, on continue à présenter quatre objets à la moitié des enfants (groupe contrôle), et leurs performances sont comparées à celles des enfants qui ont changé de nombre (groupe expérimental). La taille et la densité des objets sont contrôlées pour éviter que les enfants ne répondent à ces paramètres au lieu de répondre à celui du nombre, etc. De tels paradigmes ont été utilisés avec succès pour tester les compétences des nourrissons à des âges divers, dans le domaine du nombre, du langage, de la reconnaissance des objets, de la reconnaissance des visages, de l'établissement de catégories (un chat est-il classé dans la même catégorie qu'un éléphant ?), de la continuité des objets, bref dans tous les domaines des fonctions cognitives.

L'imagerie cérébrale chez le nourrisson se limite pour le moment aux PE. Une réponse électrique à un changement de son peut être enregistrée chez l'adulte, même lorsque celui-ci ne fait pas attention au son. Il est donc possible d'étudier les similarités et les différences dans la même situation expérimentale chez des adultes et des nourrissons. C'est ainsi que j'ai pu montrer que le cortex auditif des nourrissons est organisé, comme celui de l'adulte, en réseaux neuronaux fonctionnels distincts qui codent, en parallèle, les différentes propriétés d'un son, comme par exemple la durée ou l'intensité. Parmi ces réseaux existe chez le nourrisson, comme chez l'adulte, un réseau spécifiquement dédié au traitement des sons du langage, mais les réponses sont plus lentes chez le nourrisson que chez l'adulte et moins asymétriques [13]. On

peut donc utiliser cette méthode de la même façon que chez l'adulte.

Les études en IRMf se développent, notamment chez l'enfant. La difficulté de l'IRMf chez l'enfant tient à l'immobilité que l'on doit obtenir du sujet. Cela est possible sans trop de problèmes chez des enfants après six ans, lorsqu'on leur a expliqué l'examen, ou chez le nourrisson très jeune, qui s'endort facilement. Les âges intermédiaires resteront encore longtemps une gageure tant que ces machines ne seront pas plus conviviales ! Le jeu en vaut-il la chandelle ? Certainement. Les méthodes comportementales sont trop indirectes chez le jeune enfant, au moment où la majorité des apprentissages prennent place. De plus, une performance identique peut être obtenue par la mise en jeu de mécanismes cérébraux différents. Comme nous l'avons discuté, les études neuropsychologiques apportent peu de renseignements chez l'enfant, car elles sont difficiles et nécessiteraient déjà une bonne compréhension des mécanismes normaux d'apprentissage pour déboucher sur des hypothèses testables. Par exemple, la question de la cause de la latéralisation à gauche du langage a longtemps été l'objet de débats. Cette latéralisation est-elle présente dès le départ ou est-elle la conséquence de l'apprentissage d'un stimulus particulier, la parole, dont les caractéristiques acoustiques (rapidité des transitions) sont mieux traitées par les régions auditives gauches ? Le seul moyen d'avancer dans ce débat est de visualiser le cerveau de l'enfant en action. Des nourrissons de deux mois ont ainsi été testés en IRMf pendant qu'ils écoutaient leur langue maternelle. Les régions activées sont similaires à celles activées chez l'adulte dans la même tâche, avec une asymétrie des activations en faveur de l'hémisphère gauche [14]. De plus, alors que le lobe frontal est très immature à cet âge et a été considéré parfois comme inactif, il était activé chez les nourrissons éveillés et pas chez les nourrissons endormis. L'apprentissage du langage correspond donc non pas au recrutement de nouvelles régions céré-

Quelques livres de sciences cognitives accessibles au grand public

DE BOYSSON-BARDIES B. : *Comment la parole vient aux enfants*, 1996, Odile Jacob, Paris. Comme le titre l'indique, l'auteur explique les étapes de l'acquisition du langage.
 DEHAENE S. : *La bosse des maths*, 1997, Odile Jacob, Paris. Tout ce que vous voulez savoir sur les nombres et le cerveau.
 FRITH U. : *L'énigme de l'autisme*, 1996, Odile Jacob, Paris. Les sciences cognitives abordent aussi les troubles psychiatriques.
 PINKER S. : *L'instinct du langage*, 1999, Odile Jacob, Paris. Très grand succès de librairie dans les pays anglophones. S. Pinker aborde toutes les questions en rapport avec le langage.
 SACKS O. : *L'homme qui prenait sa femme pour un chapeau et autres récits cliniques*, 1990, Le Seuil, Paris. Un livre que devraient avoir lu tous ceux que fascinent les méandres de l'esprit humain.

brales, mais à la différenciation des régions périsylviennes gauches sous l'influence de mécanismes frontaux d'attention et d'effort.

A côté de l'imagerie fonctionnelle, de nouvelles techniques d'imagerie magnétique semblent très prometteuses pour étudier le développement normal et pathologique. L'imagerie de diffusion mesure l'ampleur et la direction du déplacement des molécules d'eau. Dans la substance blanche, les molécules d'eau bougent plus facilement le long des

fibres que perpendiculairement à celles-ci. On peut calculer un coefficient d'anisotropie (coefficient indiquant si l'eau suit une direction particulière) pour chaque élément de volume cérébral, reconstruire la direction des tracts fibreux, et découvrir d'éventuelles anomalies. Par exemple, Klingberg et al. [15] ont observé que des adultes mauvais lecteurs avaient une diminution du coefficient d'anisotropie dans les régions temporopariétales par rapport à de bons lecteurs et que le coefficient d'anisotropie dans la région temporopariétale gauche était corrélé avec les performances de lecture tant dans le groupe des mauvais lecteurs que dans celui des bons. Sur les images d'IRM anatomique classique, aucune anomalie n'était détectable. L'imagerie de diffusion permet donc de détecter des anomalies au niveau des microstructures. Cette étude ne permet pas de déterminer si cette anomalie est la cause ou la conséquence d'un problème de lecture, mais ouvre de nouvelles perspectives dans l'exploration des troubles développementaux.

CONCLUSION

J'ai tenté d'illustrer ici la démarche et les voies de recherche qu'exploitent les sciences cognitives pour comprendre le fonctionnement cérébral. Dans de prochains articles, nous verrons plus précie-

sément quelles sont nos connaissances sur le développement de telle ou telle fonction cérébrale. Alors qu'en neurologie adulte les sciences cognitives sont complètement intégrées dans la démarche diagnostique et thérapeutique, leur influence en pédiatrie est faible. J'y vois plusieurs raisons. La première est que, même au sein des sciences cognitives, les études sur le développement sont moins nombreuses. Nous avons vu les difficultés de ces études et, de ce fait, peu d'équipes de recherche sont motivées par ce travail quand on connaît la course actuelle au nombre de publications en recherche. Une deuxième raison est que les chercheurs se sont moins intéressés au développement pathologique qu'au développement normal et ont donc proposé peu d'outils au clinicien. Enfin, une ignorance mutuelle entre pédiatres et chercheurs a empêché les échanges productifs nécessaires à une dynamique créative. Pourtant, dans une société de plus en plus complexe, la demande du public est forte pour une aide face aux troubles développementaux (dyscalculie, dyslexie, troubles de l'attention, etc.) ou aux conséquences de pathologies cérébrales (lésions, épilepsie...). Seule une meilleure compréhension du développement cérébral et cognitif permettra de répondre à cette attente, et l'apport des sciences cognitives est indispensable pour atteindre cet objectif. □

Références

[1] CARAMAZZA A. : « On drawing inferences about the structure of normal cognitive processes from patterns of impaired performance : the case for single-patient studies », *Brain and Cognition*, 1986 ; 5 : 41-66.
 [2] DEHAENE S., COHEN L. : « Towards an anatomical and functional model of number processing », *Mathematical Cognition*, 1995 ; 1 : 83-120.
 [3] DEHAENE S. : *La bosse des maths*, 1997, Odile Jacob, Paris.
 [4] BENCH C. J. et al. : « Investigations of the functional anatomy of attention using the Stroop test », *Neuropsychologia*, 1993 ; 31 : 907-22.
 [5] PERNIER J., BERTRAND O. : « L'électro- et la magnéto-encéphalographie », in DEHAENE S. : *Le cerveau en action : Imagerie*

cérébrale fonctionnelle en psychologie cognitive, 1997, PUF, Paris ; p. 71-95.
 [6] DEHAENE S. : « The organization of brain activations in number comparison : Event-related potentials and the additive-factors methods », *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1996 ; 8 : 47-68.
 [7] LE BIHAN D., in DEHAENE S. : *Le cerveau en action : Imagerie cérébrale fonctionnelle en psychologie cognitive*, 1997, PUF, Paris.
 [8] PARADIS M. : *Aspects of bilingual aphasia*, 1995, Pergamon Press, Oxford.
 [9] DEHAENE S. et al. : « Anatomical variability in the cortical representation of first and second languages », *NeuroReport*, 1997 ; 8 : 3809-15.
 [10] McCLELLAND J.L., ELMAN J.L. : « The TRACE model of

speech perception », *Cognitive Psychology*, 1986 ; 18 : 1-86.
 [11] PIAGET J., SZEMINSKA A. : *La genèse du nombre chez l'enfant*, 1967, Delachaux & Niestlé, Neuchâtel.
 [12] MEHLER J., BEVER T.G. : « Cognitive capacity of very young children », *Science*, 1967 ; 158 : 141-2.
 [13] DEHAENE-LAMBERTZ G. : « Le développement de la perception phonologique chez l'enfant : études électrophysiologiques », *Revue de neuropsychologie*, 2000 ; 10 (4) : 519-33.
 [14] DEHAENE-LAMBERTZ G., DEHAENE S., HERTZ-PANNIER L. : « Functional neuroimaging of speech perception in infants », *Science*, 2002 ; 298 : 2013-5.
 [15] KLINGBERG T. et al. : « Microstructure of temporo-parietal white matter as a basis for reading ability : evidence from diffusion tensor magnetic resonance imaging », *Neuron*, 2000 ; 25 : 493-500.