

CONNAÎTRE SON CERVEAU POUR MIEUX APPRENDRE

Par Olivier Houdé, Arnaud Cachia et Grégoire Borst.

- Les scientifiques décortiquent le fonctionnement du cerveau et commencent à en informer les professeurs et les élèves. Ils livrent des outils précieux pour mieux apprendre et mieux enseigner.

Tous les organes du corps imposent leurs lois à notre santé. C'est le rôle de la médecine expérimentale de les découvrir. De même, le cerveau, organe de la pensée et de l'apprentissage, impose ses lois à l'éducation. C'est le rôle des « nouvelles sciences de l'éducation » de les découvrir, en lien avec l'imagerie cérébrale et la psychologie expérimentale du développement. Le cerveau est « l'organe qui apprend ». Ce sont des millions de cerveaux qui, chaque jour, vont à l'école. Or, l'angle mort de l'Éducation nationale reste encore le cerveau des élèves ! Mieux connaître ses lois et les

EN BREF

- Pour compter et lire, l'enfant doit savoir inhiber certains automatismes mentaux.
- Une partie du cerveau, le cortex préfrontal, remplit cette fonction. Sa forme diffère d'un enfant à l'autre à la naissance, mais des techniques éducatives permettent de le muscler.
- En connaissant les « lois » du cerveau, les enseignants espèrent proposer de meilleures stratégies d'apprentissage, adaptées à chaque enfant.



CONNAÎTRE SON CERVEAU POUR MIEUX APPRENDRE

- contraintes individuelles permettrait aux enseignants de comprendre pourquoi certaines situations d'apprentissage sont efficaces, alors que d'autres ne le sont pas.

C'est ce qui manque aujourd'hui pour lutter contre l'échec scolaire. Les « dispositifs sociaux » ne suffisent pas. On éduque encore en 2016 « en aveugle », c'est-à-dire en manipulant les entrées (pédagogies en classe) et les sorties (résultats aux évaluations), sans connaître les mécanismes internes du cerveau humain qui apprend.

DES ÉLÈVES AU LABORATOIRE

Les progrès en la matière sont toutefois très récents. En France, notre équipe a publié la toute première recherche d'imagerie cérébrale réalisée avec des jeunes volontaires des écoles maternelles et élémentaires en 2011. Il s'agissait d'explorer ce qui change dans le cerveau des enfants, âgés de 5 à 10 ans, quand ils apprennent le principe de conservation du nombre.

Pourtant, tout a commencé au XX^e siècle avec la théorie des stades de l'intelligence de Jean Piaget (1896-1980), qui a profondément marqué la psychologie, le monde de l'éducation et le grand public. Pour tester la conservation du nombre, Piaget plaçait l'enfant devant deux rangées de jetons de même nombre (7 par exemple),

Biographie

Olivier Houdé, Arnaud Cachia et Grégoire Borst

Professeurs de psychologie à l'université Paris-Descartes et chercheurs au Laboratoire de psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (LaPsyDÉ), au CNRS. Olivier Houdé dirige ce laboratoire.

mais plus ou moins écartés spatialement dans chaque ligne. Jusqu'à l'âge de 7 ou 8 ans, l'enfant considère qu'il « y a plus de jetons là où c'est plus long » (rangée la plus écartée), ce qui est une erreur d'intuition perceptive. La réussite après l'âge de 7 ans (« même nombre de jetons dans les deux rangées ») traduisait selon Piaget le passage du stade perceptif prélogique au stade de la pensée logicomathématique concrète.

Nous avons repris cette tâche en enregistrant par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) l'activité cérébrale de jeunes volontaires des écoles (âgés de 5 à 10 ans). Les résultats ont révélé que l'exercice mobilisait non seulement les régions du cerveau dédiées au nombre (le cortex pariétal), mais aussi celles du cortex préfrontal dédiées à l'inhibition des automatismes : ici, l'automatisme cognitif est que, en général, la longueur varie avec le nombre (voir l'encadré ci-dessous). D'où une révision de la théorie de Piaget, qui pensait que seul le « nombre » (à savoir le cortex pariétal) évoluait d'un stade à l'autre : il faut ajouter le rôle clé de l'inhibition cognitive préfrontale comme mécanisme du développement de l'intelligence chez l'enfant.

D'autres exemples d'exercices scolaires, étudiés en laboratoire, corroborent cette loi d'apprentissage par l'inhibition. Ils sont issus d'un

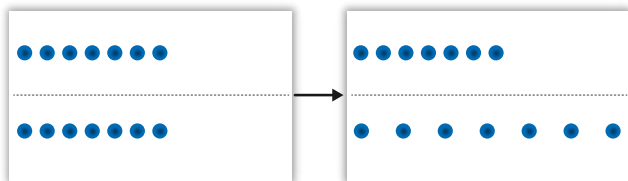
À QUEL ÂGE L'ENFANT SAIT-IL INHIBER UNE PENSÉE ?

Dans la tâche dite de conservation du nombre, les enfants doivent indiquer dans quelle rangée il y a le plus de jetons, sachant que la longueur totale des lignes varie, mais pas le nombre de jetons. Seuls ceux âgés de plus de 7 ans en moyenne y parviennent, car ils savent

inhiber l'automatisme appris selon lequel « plus c'est long, plus il y en a ». En enregistrant leur activité cérébrale pendant qu'ils réalisent l'exercice, les auteurs ont montré que le cortex préfrontal des enfants qui ne font pas d'erreur s'active davantage que celui des plus jeunes.

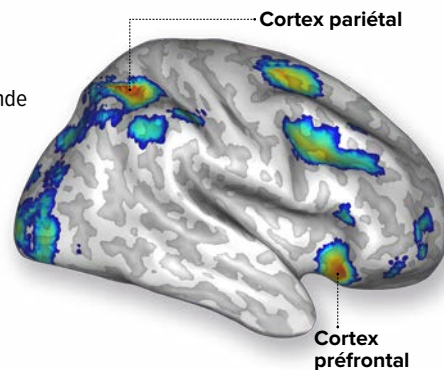
La tâche de conservation du nombre

Dans cette expérience, on demande à l'enfant s'il y a autant de jetons au-dessus et au-dessous de la ligne noire. À gauche, c'est un simple constat d'égalité, sans piège. À droite, les jetons sont espacés : pour répondre correctement, l'enfant doit inhiber l'association automatique entre longueur et nombre.



L'activité cérébrale des enfants

Les jeunes âgés de plus de 7 ans en moyenne, qui réussissent cette seconde tâche, par rapport à ceux qui se trompent, activent davantage leur cortex pariétal, dédié au nombre, et leur cortex préfrontal, dédié à l'inhibition.



aller-retour du laboratoire à l'école. Par exemple, une erreur importante observée à l'école élémentaire concerne les problèmes dits « additifs » à énoncé verbal : « Louise a 25 billes. Elle a 5 billes de plus que Léo. Combien Léo a-t-il de billes ? » La bonne réponse est la soustraction : $25 - 5 = 20$.

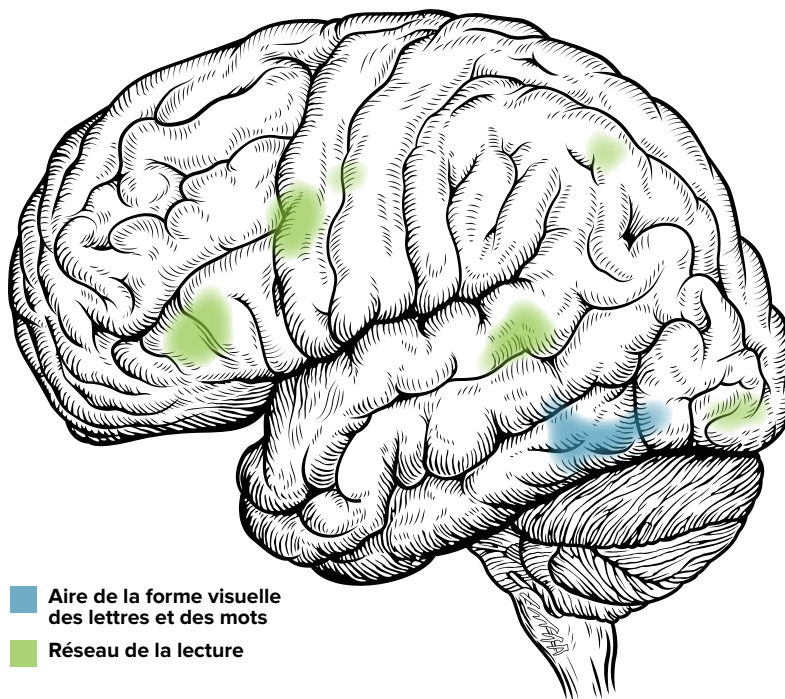
Mais souvent les élèves ne parviennent pas à inhiber l'automatisme d'addition déclenché par le « plus que » dans l'énoncé, d'où leur réponse fautive : $25 + 5 = 30$. On a confirmé expérimentalement cette loi d'apprentissage par l'inhibition en mesurant les temps de réaction (en millisecondes) des enfants. Le principe est celui de l'amorçage négatif où les jeunes doivent activer l'automatisme, juste après l'avoir inhibé. En d'autres termes, s'ils réussissent l'exercice ci-dessus, ils auront dû inhiber l'automatisme de l'addition et mettront alors un peu plus de temps dans l'exercice suivant quand l'addition fonctionne. Le temps de levée de l'inhibition nous donne ainsi rétrospectivement une mesure très précise de ce processus, qui prend en moyenne moins d'une demi-seconde.

Autre exemple, en orthographe : fréquemment, les jeunes d'école élémentaire font la faute « je les manges ». Ce n'est pas qu'ils ignorent la règle selon laquelle il n'y a pas de « s » à la première personne du singulier pour les verbes du premier groupe, mais ils sont incapables d'inhiber l'automatisme « surappris » suivant : « Après « les », je mets un « s ». » La tentation est ici trop grande pour eux, en raison de la proximité du terme « les » dans la phrase. L'enfant doit donc apprendre à inhiber, grâce à son cortex préfrontal, cette réponse dominante et automatique, pour avoir la flexibilité d'appliquer une autre stratégie de son répertoire orthographique.

On pourrait croire que cela ne concerne que les enfants. Mais combien d'e-mails ne reçoit-on pas de collègues ou amis qui écrivent « je vous le direz » au lieu de « je vous le dirai ». C'est exactement le même défaut d'inhibition frontale, renforcé par la rapidité de l'écriture électronique.

EN MATHS, EN ORTHOGRAPHE, EN LECTURE...

Après les maths et l'orthographe, la lecture, une compétence pour laquelle il est essentiel de comprendre comment le cerveau fonctionne. On sait que les apprentis lecteurs, comme les lecteurs experts, doivent toujours éviter de confondre les lettres dont l'image en miroir constitue une autre lettre : par exemple, « b » et « d » ou « p » et « q ». Cette difficulté est renforcée par le fait que, pour apprendre à lire, le cerveau doit, ainsi que l'a montré le neuroscientifique français Stanislas Dehaene, recycler des neurones initialement utilisés pour identifier les objets de l'environnement : les animaux par exemple.



■ Aire de la forme visuelle des lettres et des mots
■ Réseau de la lecture

● Pour distinguer le « b » du « d » et le « p » du « q » quand il lit, l'enfant doit inhiber un automatisme selon lequel un objet est identique dans un miroir. Cela se passe dans l'aire de la forme visuelle des lettres et des mots (en bleu), qui s'active en même temps que les autres régions du réseau de la lecture (en vert).

Or un animal est le même quelle que soit son orientation par rapport à un axe de symétrie. Pour discriminer les lettres en miroir, notre cerveau apprend donc à inhiber ce biais cognitif. Nous avons récemment démontré expérimentalement que tant les adultes que les enfants, inconsciemment, doivent toujours résister à la généralisation en miroir.

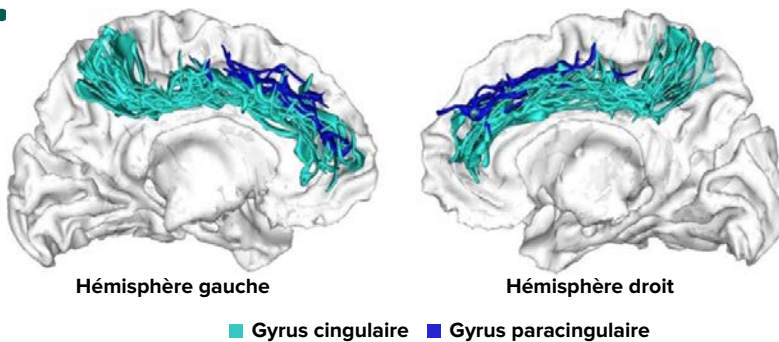
LE CERVEAU RECYCLE DES NEURONES POUR LES NOUVEAUX APPRENTISSAGES

La loi d'apprentissage du cerveau est ici : « recyclage neuronal + inhibition ». Cela se passe, pour la lecture, dans une région de la voie ventrale de l'hémisphère gauche que nous avons identifiée en réalisant une métaanalyse d'IRMf sur plusieurs centaines d'enfants : l'aire de la forme visuelle des lettres et des mots (voir la figure ci-dessus).

Cette loi du « recyclage + inhibition » est sans doute valable aussi pour les maths, en particulier quand il est nécessaire d'inhiber certaines dimensions spatiales non pertinentes (telle la longueur dans la tâche des jetons de Piaget), qui se superposent ou se jouxtent avec les régions du nombre dans le cortex pariétal, au niveau du sillon intrapariétal. Nous testons actuellement ce cas. Mais nous supposons déjà que le cortex préfrontal intervient à longue distance pour inhiber dans le cortex pariétal les dimensions spatiales non pertinentes et activer les régions du nombre.

Il ne suffit donc pas d'apprendre et de connaître les règles en maths (comptage, arithmétique), en français (lecture, orthographe), ●●●

CONNAÎTRE SON CERVEAU POUR MIEUX APPRENDRE



■ Gyrus cingulaire ■ Gyrus paracingulaire

grâce à la pratique, la répétition, etc., comme cela se fait souvent à l'école; il faut également dans certains cas «éduquer» le cortex préfrontal, c'est-à-dire apprendre à inhiber les automatismes du cerveau. C'est ce que l'un de nous, Olivier Houdé, a appelé la résistance cognitive.

ÉDUCER LE CORTÈX PRÉFRONTAL

Tant en France qu'au Canada (l'équipe d'Adele Diamond à Vancouver notamment), des expériences d'interventions pédagogiques pilotes de ce type sont aujourd'hui menées dans les écoles pour exercer le «contrôle cognitif», capacité que l'on désigne aussi à travers le terme de fonctions exécutives. Ces interventions sont directement issues de la meilleure compréhension que nous avons des mécanismes d'apprentissage du cerveau: recyclage neuronal, inhibition cognitive... Par exemple, on propose aux élèves une tâche de logique (comme le calcul des billes de Léo), puis on les entraîne à inhiber leur idée première en leur demandant de s'exercer avec un « attrape-pièges ». Ce dispositif est une planche didactique avec un espace hachuré, symbolisant la zone inhibitrice, où ils doivent glisser le carton qui correspond à leur première réponse automatique.

En imagerie cérébrale, nous avons mis en évidence le changement qui se produit dans le cerveau des élèves lorsqu'ils passent, au cours de cette tâche, d'un mode perceptif facile, automatisé mais erroné, à un mode logique, difficile et exact. Les résultats indiquent un basculement très net des activations cérébrales de la partie postérieure du cerveau au cortex préfrontal – c'est la dynamique inverse de l'automatisation.

Aujourd'hui, nous menons avec des élèves volontaires de CM1 et CM2 un large programme de suivi de l'impact sur le cerveau et les apprentissages scolaires d'un entraînement quotidien au mécanisme d'inhibition sur tablette tactile durant un mois. Nous avons conçu un jeu éducatif reposant sur ce processus *a priori* «bon pour le cerveau», en particulier le cortex préfrontal. Dans ce

♦ **Tous les enfants n'ont pas le même cerveau: cette image montre les différentes formes que peut prendre une structure importante pour l'apprentissage, le gyrus cingulaire. Chaque petit faisceau bleu représente le trajet du gyrus cingulaire ou paracingulaire d'un enfant. Or, sa forme peut influencer sur la capacité de celui-ci à bloquer des réponses réflexes erronées pour élaborer une réponse plus adaptée. Différentes pédagogies pourraient donc être envisagées selon le profil cérébral de chaque apprenant.**

20 %
DU SUCCÈS
DES ENFANTS

lors d'une tâche de «contrôle cognitif» seraient déterminés par la forme de leur cerveau à la naissance.

Mais les moins doués naturellement progressent en grandissant et en s'entraînant.

jeu, il s'agit par exemple d'inhiber sa réponse (c'est-à-dire de ne pas appuyer sur l'écran tactile) quand on entend un signal *stop*. Il y a bien entendu des conditions contrôles sans apprentissage de ce type. Cette étude (au cours de laquelle seront réalisées trois IRM) porte sur 150 enfants. Nous aurons les premiers résultats d'ici Noël – et les résultats complets en 2019. Mais nous imaginons déjà que les enfants entraînés seront plus performants que les autres lorsqu'il faut inhiber un automatisme de réponse dans un problème cognitif ou scolaire, et que leur cortex préfrontal sera plus actif.

Un autre programme de recherche tout à fait nouveau porte non pas sur les lois fonctionnelles du cerveau, telles que nous venons de les voir, mais sur les contraintes structurales précoces. Il s'agit de la forme des sillons du cerveau de chaque enfant observés en imagerie par résonance magnétique anatomique ou structurale. Pour l'instant, nous avons découvert une grande variabilité d'un enfant à l'autre (voir la figure ci-contre). Ces différences ont-elles un sens cognitif? Dit autrement, cette variabilité anatomique, qui se met en place *in utero*, est-elle en partie prédictive des performances cognitives et scolaires des enfants au cours du développement? Voilà une nouvelle façon de comprendre les relations entre inné et acquis.

L'INFLUENCE DE LA FORME DU CERVEAU

C'est ainsi que nous avons découvert, en collaboration avec Jean-François Mangin du Centre de recherche NeuroSpin, que l'anatomie du cerveau influe sur le contrôle cognitif, compétence essentielle pour l'apprentissage et la réussite scolaire comme nous venons de le voir avec l'inhibition. Un motif particulier du cortex cingulaire antérieur, situé sur la face interne du cortex préfrontal, explique environ 20 % des performances d'enfants âgés de 5 ans dans une tâche qui permet de mesurer le contrôle cognitif: le test de Stroop. Les petits doivent dire le nom d'un animal dont la tête et le corps sont parfois incongruents (en conflit). Mais c'est le corps qui compte. Dès lors, l'enfant doit inhiber son premier réflexe (qui est de se baser sur la tête pour identifier l'animal). C'est un test de détection de conflits et d'inhibition.

Ces capacités cognitives, qui se déploient au cours du développement, sont donc liées pour une bonne part à une contrainte anatomique précoce: le plissement du cerveau dans la boîte crânienne qui détermine la forme des sillons. C'est ce que l'on appelle les motifs sulcogyraux, notre cerveau étant constitué de gyrus (les montagnes) et de sillons (les vallées). Ce relief se met en place lors de la construction du cerveau chez le fœtus. Le bébé est donc doté de cette

organisation à la naissance, de sorte que certains enfants acquièrent plus facilement diverses aptitudes cognitives comme l'inhibition.

En allant encore plus loin, nous avons confirmé cette prédiction anatomique par un suivi des mêmes enfants à la fin de l'école primaire, en utilisant la même version de la tâche de Stroop et une version plus complexe, adaptée à leur niveau : le Stroop lecture, par exemple identifier la couleur du mot *rouge* écrit en vert. L'enfant doit inhiber l'automatisme de lecture du mot écrit et répondre «vert». Dans ce cas, le motif préfrontal interne (cortex cingulaire antérieur) explique encore environ 20 % des performances des jeunes.

Tout n'est cependant pas déterminé à la naissance ! Car 80 % de la variabilité restent dus à divers facteurs environnementaux tels que les expériences, l'éducation ou des éléments socio-économiques. Néanmoins, ces résultats montrent que selon les caractéristiques de leur cerveau, les enfants ont parfois des besoins pédagogiques différents en matière d'apprentissage du contrôle cognitif. Or, cette aptitude pourrait être améliorée grâce à un entraînement spécifique, comme celui de l'attrape-pièges ou du signal stop sur tablettes. Ainsi, c'est un champ scientifique nouveau qui s'ouvre, à l'interface de l'anatomie cérébrale, de la psychologie du développement cognitif et de l'éducation.

PRÉVOIR LES PERFORMANCES SCOLAIRES

Forts de ces premiers résultats, nous avons très récemment testé ce type de contrainte structurale précoce dans le domaine de la lecture, un apprentissage scolaire et culturel fondamental. Nous avons déjà vu que, pour cet apprentissage, l'une des régions principales d'intérêt est l'aire de la forme visuelle des lettres et des mots qui correspond à un sillon particulier du cerveau : le sillon occipitotemporal latéral de l'hémisphère gauche.

Nos analyses indiquent que, dans ce cas aussi, la forme (la brisure) de ce sillon prédit les performances dans un test de lecture réalisé par des enfants âgés de 9 ans. Ces travaux se poursuivent actuellement en collaboration avec Stanislas Dehaene de NeuroSpin sur une autre base de données qu'il a acquise, de manière à voir si le résultat se confirme.

Ainsi, qu'il s'agisse des lois de fonctionnement du cerveau qui apprend (recyclage, inhibition...) ou des contraintes structurales (motifs sulcogyraux), pour la première fois dans l'histoire, on peut réellement parler de sciences de l'éducation au sens fort du terme. Il s'agit de neuroéducation. Plus exactement, ce sont des neurosciences développementales appliquées

Selon la structure de leur cerveau, les enfants ont des besoins différents en matière d'apprentissage

aux phénomènes d'apprentissage chez l'homme, en particulier les élèves.

Parlera-t-on bientôt de neuropédagogie ? Les professeurs des écoles sont-ils suffisamment informés de ces découvertes récentes ? Non, pas encore, même si l'intérêt pour la neuroéducation va croissant, un peu partout. Il ne s'agit toutefois pas d'imposer des méthodes aux professeurs. L'idée est simplement qu'ils s'approprient ces connaissances nouvelles sur les lois et contraintes du cerveau. La pédagogie reste un art, mais peut-être gagnerait-elle à s'appuyer sur des données scientifiques actualisées. En retour, le monde de l'éducation, informé qu'il est de la pratique quotidienne – l'actualité de la pédagogie –, peut suggérer des idées originales d'expérimentation. Ces découvertes commencent aussi à être enseignées aux étudiants des nouvelles Écoles supérieures du professorat et de l'éducation (ESPE) en France. Mais c'est le tout début ! Beaucoup reste à faire.

Revenons, pour finir, sur le contrôle cognitif et en particulier la capacité d'inhibition du cortex préfrontal. Nous avons montré que c'est un « prédicteur » puissant de la réussite scolaire tout au long du cursus académique. En outre, les enfants apprécient beaucoup qu'on leur explique, dès la maternelle et l'école élémentaire, comment fonctionne leur cerveau. Nous le faisons régulièrement pour expliquer dans les écoles les projets de recherche du laboratoire. Cette information aux jeunes est une demande des comités d'éthique qui examinent en amont tous les projets de ce type, en particulier ceux qui utilisent l'IRM. Mais cette « initiation au cerveau » est aussi utile et doit être poursuivie au collège et au lycée. Car à tout âge, un jeune qui sait comment son cerveau fonctionne comprend mieux et apprend mieux ! ●

Bibliographie

E. Arh et al., Inhibition of the mirror-generalization process in reading in school-aged children, *Journal of Experimental Child Psychology*, vol. 145, pp. 157-165, 2016.

A. Cachia, G. Borst et al., The shape of the anterior cingulate cortex (ACC) contributes to cognitive control efficiency in pre-schoolers, *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 26, pp. 96-106, 2014.

O. Houdé et al., Functional MRI study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: A neo-Piagetian approach, *Journal of Experimental Child Psychology*, vol. 110, pp. 332-346, 2011.