

Psychologie cognitive expérimentale

M. Stanislas DEHAENE, membre de l'Institut
(Académie des sciences), professeur

ENSEIGNEMENT

Cours : Fondements cognitifs des apprentissages scolaires^a

Le cours 2014 a été consacré aux liens qu'entretiennent ou que devraient entretenir les sciences cognitives avec les sciences de l'éducation. Ces liens sont nombreux et réciproques. Comprendre comment l'éducation parvient à transformer le cerveau humain est l'un des grands problèmes ouverts en neurosciences cognitives, qui soulève de nombreuses questions passionnantes : comment les apprentissages scolaires (langues première et seconde, lecture, écriture, mathématiques) s'inscrivent-ils dans les circuits de notre cerveau ? Quels rôles respectifs jouent l'organisation précoce et la plasticité cérébrale dans ces modifications ? Pourquoi l'espèce humaine est-elle la seule qui parvienne à modifier ses représentations mentales et ses circuits cérébraux par le biais d'un enseignement explicite ? Les spécialistes de l'éducation, eux, attendent des sciences cognitives qu'elles les aident à répondre aux grands défis que pose l'éducation de masse au XXI^e siècle : comment maximiser le potentiel de tous les enfants ? Quelles méthodes pédagogiques, quels principes d'organisation de la classe sont-ils les mieux à même de faciliter l'apprentissage pour tous, et ainsi de réduire les inégalités sociales qui sont particulièrement criantes dans notre pays ?

Au cours des trente dernières années, d'importants progrès ont été réalisés dans la compréhension des principes fondamentaux de la plasticité cérébrale et de l'apprentissage. Le fonctionnement de la mémoire, le rôle fondamental de l'attention, l'importance du sommeil sont autant de découvertes riches de conséquences pour l'organisation scolaire. Les compétences des très jeunes enfants pour le langage, l'arithmétique, la logique ou l'estimation des probabilités remettent en question certains postulats fondamentaux des théories constructivistes de l'apprentissage, en démontrant l'existence d'intuitions précoces et abstraites sur lesquelles l'enseignement

a. Les enregistrements audio et vidéo du cours sont disponibles sur le site internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/course-2014-2015.htm>.

doit s'appuyer. La réalité de pathologies du développement telles que la dyslexie, la dyscalculie, la dyspraxie, ou les troubles de l'attention, ne fait plus de doute, et des stratégies existent pour les détecter et les compenser.

Je suis convaincu que nous ne pouvons pas enseigner convenablement sans posséder, implicitement ou explicitement, un modèle mental de ce qui se passe dans la tête de l'enfant – quelles sont ses intuitions, correctes ou erronées, quelles sont les étapes par lesquelles il doit passer pour progresser, et quels facteurs l'aident à développer ses compétences. Tous les enfants démarrent dans la vie avec une organisation cérébrale similaire. Il existe donc des principes fondamentaux que tout enseignement, s'il se veut efficace, se doit de respecter (tout en demeurant compatibles avec une grande liberté pédagogique). L'objectif de ce cours est de les mettre en évidence et d'en tirer des conséquences pour l'enseignement.

Éducation, plasticité cérébrale et recyclage neuronal

Dans le domaine de l'apprentissage, il est vain d'opposer l'inné et l'acquis, l'environnement et l'hérédité. Dès 1949, le psychologue canadien Donald Hebb l'énonce :

Deux facteurs déterminent la croissance intellectuelle : un potentiel inné, absolument indispensable, et un environnement stimulant, tout aussi indispensable. Il est inutile de se demander lequel est le plus important. On pourrait supposer que l'intelligence croît jusqu'à la limite fixée par l'hérédité ou par l'environnement – le minimum des deux. Dans un environnement parfait, c'est la structure innée qui fixe la cadence ; mais en partant d'une hérédité de génie, c'est l'environnement qui domine.

Les neurosciences contemporaines confirment qu'il n'existe aucune contradiction à affirmer, simultanément, l'origine génétique des principaux circuits du cerveau humain, et leur capacité à se modifier sous l'effet de règles d'apprentissage, elles-mêmes gouvernées par des mécanismes cellulaires et moléculaires innés. L'éducation tire profit de la plasticité innée de certains circuits cérébraux, qui est maximale chez l'enfant. Même une vaste lésion pré- ou post-natale, affectant la quasi-totalité d'un hémisphère cérébral, lorsqu'elle survient à un âge précoce, peut n'avoir que des conséquences limitées sur la mise en place du langage, des compétences visuo-spatiales, de la motricité et même des cartes visuelles. Sans bouleverser radicalement l'organisation des circuits cérébraux, la plasticité peut réorienter les fonctions cérébrales vers des circuits corticaux proches ou symétriques des circuits habituellement concernés. Une lésion similaire à l'âge adulte conduit à des conséquences bien plus dramatiques : hémiplégie, champ visuel aveugle, aphasie, etc.

Cependant, qu'entendons-nous exactement par *plasticité cérébrale* ? Ces vingt dernières années, de nombreuses expériences ont définitivement établi que l'apprentissage repose sur le renforcement ou, au contraire, l'élimination de synapses. Ces points de contact entre les neurones, qui définissent les réseaux par lesquels les informations sont codées et relayées, constituent les traces de mémoire de nos expériences et modifient le comportement de nos neurones. Les méthodes récentes d'imagerie démontrent que ces synapses se remodelent en permanence. L'activité neuronale, ou son absence, module sélectivement la stabilité des synapses. Les épines dendritiques, structures qui accueillent les synapses excitatrices sur les neurones pyramidaux du cortex, apparaissent ou disparaissent à des échelles de temps allant de quelques secondes à quelques jours. Le branchement des axones se

réorganise également, quoique de façon moins rapide. Enfin, la myélinisation des axones peut également être modifiée par l'usage.

Ces changements ont lieu tout au long de la vie, mais avec une intensité particulière dans l'enfance. On appelle « période critique » ou « période sensible » une fenêtre temporelle pendant laquelle les circuits neuronaux présentent une capacité particulière de s'adapter aux entrées qu'ils reçoivent de leur environnement. L'existence de périodes critiques est attestée dans le système visuel : en l'absence de vision binoculaire dans les premiers mois ou années de vie, les entrées visuelles en provenance d'un œil cessent d'être utilisées efficacement (amblyopie). Il existerait également une hiérarchie de périodes critiques dans d'autres domaines, tout particulièrement l'acquisition du langage. La capacité d'apprentissage d'une seconde langue présente une baisse continue avec l'âge, particulièrement prononcée à la puberté. La capacité de discrimination des phonèmes de la langue maternelle n'est présente que si l'enfant a interagi avec un locuteur de cette langue avant 12 mois. Les enfants sourds doivent rapidement recevoir un implant cochléaire (avant 3 ans et demi, voire 18 mois selon certaines données), faute de quoi leurs compétences pour le langage parlé diminuent fortement.

L'ouverture et la fermeture des périodes critiques sont étroitement liées à la maturation des circuits inhibiteurs qui reposent sur le neurotransmetteur GABA. Les cellules « PV » (exprimant la parvalbumine) sont de grands neurones inhibiteurs également appelés « cellules en panier » (*basket cells*), présents dans le cortex et l'hippocampe. Leur maturation joue un rôle essentiel dans la fermeture de la plasticité en modulant le rapport excitation/inhibition. Au cours de la maturation cérébrale, ces neurones s'entourent de réseaux péri-neuronaux figés (protéines + sucres), ce qui limite la plasticité à l'âge adulte. Cependant, ces phénomènes ne dépendent pas uniquement de l'âge, mais aussi de facteurs environnementaux et pharmacologiques. L'étude de la plasticité dans l'hippocampe de la souris montre que, même à l'adulte adulte, l'enrichissement de l'environnement augmente considérablement les capacités d'apprentissage, tandis qu'inversement, la peur conditionnée les réduit. Ces modulations de la capacité d'apprentissage sont liées à un changement de la fraction de synapses inhibitrices sur les cellules PV.

Pouvons-nous généraliser ces résultats à l'espèce humaine ? L'exemple tristement célèbre des orphelinats de Roumanie le suggère. Après avoir passé leurs premiers mois ou années de vie dans un environnement dépourvu de stimulations et d'interactions sociales, les enfants développent des anomalies de volume de matière grise, avec des conséquences importantes dans de nombreux domaines du langage et des apprentissages. Cependant, ces troubles cognitifs, s'ils sont pris en charge rapidement, ne sont pas irréversibles. Le Bucharest Early Intervention Project dirigé par Chuck Nelson montre l'importance d'un placement familial précoce. Les enfants placés dans des familles montrent de nets avantages de développement physique et mental, notamment dans les domaines du langage et des compétences sociales. Plus le placement est précoce, plus l'effet est net. Dans de nombreux domaines, aucune anomalie n'est détectée lorsque les enfants sont placés avant 20 mois.

Comment théoriser ces effets à la fois massifs et contraints de l'exposition à l'environnement ? Pour comprendre comment des circuits cérébraux d'un haut degré d'organisation innée, issus de notre évolution, parviennent néanmoins à se réorienter pour acquérir des compétences nouvelles, j'ai proposé l'*hypothèse du recyclage neuronal*. Celle-ci souligne l'importance des contraintes anatomiques héritées de son évolution. Des cartes neurales et des circuits cérébraux organisés

sont présents dès l'enfance et biaisent les apprentissages. Les acquisitions culturelles nouvelles ne sont possibles que dans la mesure où elles sont compatibles avec ces architectures neurales préexistantes, qu'elles recyclent. Chaque objet culturel doit donc trouver sa « niche neuronale » dans le cerveau : un circuit dont le rôle initial est assez proche, et dont la flexibilité est suffisante pour être reconverti à ce nouvel usage. Inversement, chaque circuit cérébral possède des propriétés intrinsèques, qui le rendent plus ou moins approprié à son nouvel usage. Ces propriétés contraignent les formes culturelles et leur confèrent des traits universels. Nous apprenons tous à lire ou à calculer en faisant appel aux mêmes circuits cérébraux. C'est pourquoi il est essentiel de comprendre comment ces circuits sont organisés dans la petite enfance et se transforment sous l'effet de l'éducation, afin d'en optimiser le fonctionnement. L'éducation tire profit de la très longue fenêtre de plasticité de l'espèce humaine, mais celle-ci n'est pas infinie et obéit à des règles précises.

Quelles sont les conséquences éducatives de ces découvertes ? Puisque le cerveau de l'enfant est plastique et doté de puissants algorithmes d'inférence statistique, la famille et l'école doivent lui fournir, dès le plus jeune âge, un environnement enrichi, structuré et stimulant. Comme la plasticité cérébrale est modulée, positivement par l'enrichissement de l'environnement, et négativement par la peur et les émotions négatives, l'environnement familial et scolaire doit être varié, riche en renforcements positifs, et libéré de toute peur. Les parents et les enseignants doivent également savoir que même des lésions cérébrales massives peuvent être en partie surmontées, et qu'ils ne doivent donc pas céder au découragement. Toutefois, la plasticité ne doit pas non plus être surestimée. Le cerveau de l'enfant est structuré dès la naissance, ce qui lui confère des intuitions profondes dans le domaine des objets, de l'espace, des nombres ou du langage, mais impose également des limites à l'apprentissage. Tous les enfants seront confrontés à des difficultés similaires. Il existe des limites biologiques universelles à la plasticité cérébrale. L'existence de périodes critiques fait que certaines stimulations, tout particulièrement l'exposition aux langues, doivent impérativement être fournies précocement.

L'attention et le contrôle exécutif

Les sciences cognitives ont identifié au moins quatre facteurs clés que l'on peut qualifier de « piliers de l'apprentissage » dans la mesure où ils jouent un rôle déterminant dans la vitesse et la facilité de l'ensemble des apprentissages scolaires : l'attention ; l'engagement actif de l'enfant ; le retour rapide d'informations ; et la consolidation quotidienne des apprentissages.

Commençons par *l'attention*, qui peut être définie comme l'ensemble des mécanismes par lesquels le cerveau sélectionne une information et en oriente le traitement. Le psychologue américain Michael Posner distingue au moins trois systèmes attentionnels : l'alerte, qui module globalement le niveau de vigilance ; l'orientation de l'attention, qui sélectionne un objet ; et le contrôle exécutif, qui sélectionne la chaîne de traitements appropriée à une tâche donnée et en contrôle l'exécution. Chacun de ces systèmes module massivement l'activité cérébrale et peut donc faciliter l'apprentissage, mais aussi l'orienter dans la mauvaise direction. Le plus grand talent d'un enseignant consiste sans doute à canaliser et captiver, à chaque instant, l'attention de l'enfant afin de l'orienter vers le niveau approprié.

Les systèmes cérébraux d'*alerte* et de *vigilance* signalent *quand* il convient de faire attention. Ils s'accompagnent de la libération massive et diffuse de

neuromodulateurs tels que la sérotonine et l'acétylcholine. Ceux-ci modulent massivement l'activité corticale et l'apprentissage. Des expériences chez l'animal montrent que leur décharge peut radicalement altérer la plasticité des cartes corticales auditives ou tactiles. Les travaux de Daphné Bavelier suggèrent que les jeux vidéo fournissent un moyen particulièrement efficace de mobiliser ces systèmes.

Le système d'*orientation* de l'attention détermine à *quoi* nous prêtons attention. L'attention amplifie les signaux sélectionnés, mais réduit également dramatiquement ceux qui sont jugés non-pertinents. L'expérience du gorille invisible de Simons et Chabris (1999) illustre ce phénomène de cécité inattentionnelle : focaliser son attention sur un objet de pensée nous rend aveugles à d'autres stimuli pourtant proéminents. Bruce McCandliss et ses collaborateurs ont montré l'importance de l'attention sélective dans l'apprentissage de la lecture : prêter attention à la forme globale du mot empêche de découvrir le code alphabétique et oriente l'activité cérébrale en direction d'un circuit inapproprié de l'hémisphère droit.

L'attention sélective donne accès à un système cérébral central dont la capacité est limitée. À ce niveau de traitement, qui est lent et sériel, le cerveau ne parvient pas à réaliser deux tâches simultanément : l'attention forme un goulot d'étranglement qui, soit, rend les stimuli invisibles (effet de clignement attentionnel ou *attentional blink*), soit en ralentit massivement le traitement (effet de période psychologique réfractaire ou *psychological refractory period*). En situation de « double tâche », c'est-à-dire lorsque l'on demande de réaliser plusieurs opérations cognitives sous le contrôle de l'attention, l'une des deux opérations au moins sera ralentie, voire totalement laissée de côté.

Les travaux de Gergely et Csibra montrent que, chez l'enfant, le contexte social joue un rôle essentiel dans l'orientation de l'attention. La présence d'un tuteur humain module massivement l'apprentissage en orientant l'attention de l'enfant vers l'objet à apprendre (attention partagée). Elle induit également une « posture pédagogique » qui incite l'enfant à interpréter l'information présentée comme importante et généralisable. Dès la première année de vie, de nombreuses expériences démontrent à quel point la présence d'un tuteur humain module les apprentissages.

Le système d'*attention exécutive*, enfin, détermine *comment* les informations sélectionnées sont traitées. On désigne sous le terme de « contrôle exécutif » l'ensemble des processus qui sous-tendent la planification, la sélection, l'initiation, l'exécution et la supervision des comportements volontaires dirigés vers un but. Ce sont ces processus qui assurent une certaine flexibilité cognitive en permettant l'assemblage de stratégies nouvelles, non-routinières. Parmi les processus qui relèvent du contrôle exécutif figurent le maintien d'un but ; la sélection des représentations et des opérations pertinentes pour atteindre ce but ; l'inhibition des actions inappropriées ; le changement de stratégie ; et la détection et la correction des erreurs qui éloignent du but.

Le développement du contrôle exécutif est un aspect lent et essentiel du développement de l'enfant. Celui-ci apprend progressivement à se contrôler, c'est-à-dire à privilégier les stratégies appropriées et à inhiber les stratégies inadéquates. La psychologie cognitive regorge de tâches où l'on voit l'enfant, en quelques mois ou années, surmonter une stratégie erronée en développant sa capacité de contrôle inhibiteur : erreur A-non-B de Piaget, erreurs de non-conservation du nombre, choix des stratégies en calcul mental, raisonnement logique... L'imagerie cérébrale montre que l'accroissement du contrôle s'accompagne d'une augmentation d'activité dans diverses régions du cortex préfrontal et cingulaire. Cet accroissement peut être

accéléral par l'entraînement. De nombreuses activités ludiques développent le contrôle exécutif, par exemple l'entraînement moteur (Montessori), la pratique d'un instrument de musique, la méditation... D'autres études démontrent également le bénéfice d'un entraînement de la capacité de la mémoire de travail. Les travaux de Daphné Bavelier montrent des bénéfices importants des jeux vidéo d'action, qui sollicitent vigoureusement l'attention et la décision ultra-rapide. Les effets de ces entraînements semblent se généraliser à de nombreux domaines et bénéficier tout particulièrement aux enfants de milieu défavorisé. Certaines recherches démontrent que, dans les familles de bas niveau socio-économique, enseigner aux parents les fondamentaux de l'apprentissage et de l'attention peut être l'un des meilleurs investissements éducatifs.

Quelles sont les conséquences de ces découvertes pour le système éducatif ? Puisque l'attention détermine les apprentissages, mobiliser l'attention des enfants est un objectif prioritaire. L'enseignant doit créer des matériaux attrayants et qui ne distraient pas l'enfant de sa tâche primaire. Tout doit être mis en œuvre pour orienter l'attention vers le niveau pertinent. Étant donné la sensibilité du cerveau de l'enfant aux indices sociaux, l'attitude de l'enseignant est essentielle : il doit s'attacher l'attention de l'enfant par le contact visuel et verbal. Il doit également prendre garde à ne pas créer de « double tâche », particulièrement chez les enfants en difficulté. Enfin, le contrôle exécutif est l'une des plus importantes compétences transversales que l'école peut faire grandir en pratiquant, dès la maternelle, des exercices pour apprendre à se contrôler, à se concentrer, à prêter attention à ses limites (métacognition) et à se corriger.

L'engagement actif, la curiosité, et la correction des erreurs

Outre l'attention, deux facteurs jouent un rôle déterminant dans les apprentissages : l'engagement actif de l'enfant et le retour rapide d'informations (*feedback*). Selon la théorie du « cerveau bayésien », que nous avons examinée dans les années précédentes, l'algorithme fondamental qui permet au cerveau d'ajuster ses représentations du monde extérieur consiste en trois étapes : (1) prédiction descendante, fondée sur le modèle interne actuel ; (2) comparaison de ces prédictions avec les entrées reçues du monde extérieur, ce qui engendre des signaux d'erreur ; et (3) utilisation de ces signaux d'erreur afin d'ajuster le modèle interne. Ce modèle du cerveau bayésien suggère que deux ingrédients sont indispensables à l'apprentissage : la génération d'une anticipation sur le monde extérieur (engagement actif), et le retour d'information sous la forme de signaux d'erreur (en provenance de l'environnement ou de l'enseignant).

De nombreuses expériences, chez l'animal comme chez l'homme, au laboratoire ou à l'école, démontrent qu'un organisme passif n'apprend pas. En écho à ces travaux de neurosciences fondamentales, la recherche pédagogique indique que le cours magistral, où l'esprit des enfants peut vagabonder, est moins efficace que ne le sont les pédagogies actives, qui sollicitent l'engagement de l'enfant. Selon les expériences d'Henry Roediger et ses collaborateurs, à temps constant, l'apprentissage est optimal lorsqu'on alterne des périodes d'enseignement explicite et des périodes de test des connaissances. Les tests ne se contentent pas de mesurer les acquis, mais font partie intégrante de la pédagogie, car ils permettent à l'enfant de s'évaluer et de se corriger. L'étude de la métacognition montre que nous surestimons fréquemment nos apprentissages. De nombreux étudiants pratiquent la relecture du

cours, mais cette stratégie n'a guère d'effet : c'est la mise à l'épreuve explicite des connaissances, doublée d'un retour rapide sur les éventuelles erreurs, qui constitue la meilleure stratégie.

L'idée que l'enfant doit être un acteur engagé de son propre apprentissage ne doit pas être confondue avec celle de « pédagogie de la découverte », qui voudrait que l'enfant s'empare seul d'un domaine, avec un minimum d'intervention de l'enseignant. Il ne s'agit pas de laisser l'enfant découvrir lui-même le contenu à apprendre, mais de lui proposer un environnement pédagogique structuré qui engage son attention, sa volonté et sa curiosité. Toute une série d'études, étagées sur plusieurs décennies et de nombreux domaines (lecture, mathématiques, programmation informatique, etc.) a démontré de façon répétée que, laissés à eux-mêmes, les enfants éprouvent les plus grandes difficultés à découvrir spontanément les règles qui gouvernent un domaine. La pédagogie de la découverte fait partie des mythes éducatifs que réfute un article intéressant de Kirschner et van Merriënboer (2013), au même titre que l'idée répandue mais fautive que les enfants de la nouvelle génération sont des champions du monde digital (*digital natives, homo Zapiens*), ou que chacun possède son propre style d'apprentissage.

Chez tous les êtres humains, comme chez l'animal, la *surprise*, c'est-à-dire le décalage entre les attentes et la réalité, joue un rôle déterminant dans l'apprentissage. Des expériences de « blocage » (*blocking*) chez le rat battent en brèche la notion d'apprentissage purement associatif. En effet, il n'existe aucun apprentissage de l'association répétée de deux signaux lorsque cette association est déjà prédite par un troisième signal : pas de surprise, pas d'apprentissage. À l'inverse, chez l'enfant, les travaux récents de Lisa Feigenson montrent que dès qu'un événement visuel inattendu suscite une réponse de surprise chez l'enfant cette surprise s'accompagne d'un apprentissage accru.

L'enfant n'attend pas seulement la nouveauté de façon passive, mais il la recherche activement : c'est ce qu'on appelle la *curiosité*. Selon Hunt (1965) et Berlyne (1960), la curiosité serait un signal spécifique de motivation pour l'exploration des situations inconnues. Selon Loewenstein (1994), elle résulterait de l'identification d'un décalage entre ce que l'on connaît et que l'on aimerait connaître, décalage que l'on tente de réduire. Kaplan et Oudeyer (2007) postulent qu'un organisme agit avec curiosité lorsqu'il recherche les situations dans lesquelles l'apprentissage est maximal. L'enfant examinerait les différents environnements à sa disposition et choisirait celui où la vitesse d'apprentissage (diminution des signaux d'erreur) est la plus grande. Simulé chez un robot, cet algorithme conduit à une implémentation effective de la curiosité : le robot apprend successivement les différentes propriétés des objets mis à sa disposition, puis les délaisse tour à tour avec ennui dès que s'installe une absence de progrès.

Les neurosciences et l'imagerie cérébrale chez l'homme suggèrent que la curiosité passe par l'activation endogène du circuit dopaminergique de la récompense. Ainsi, en l'absence de tout renforcement explicite, le simple fait de parvenir à apprendre constitue une récompense en soi. L'information nouvelle possède une valeur intrinsèque pour le système nerveux. Ce que nous appelons la curiosité n'est rien d'autre que l'exploitation de cette valeur.

Pourquoi, dans ces conditions, l'école semble-t-elle rapidement altérer la curiosité des enfants ? Les expériences de Bonawitz et coll. (2011) fournissent une piste de recherche. Elles montrent que l'enfant à qui on fournit un enseignement trop explicite finit par accorder une confiance plus grande à l'enseignant qu'à ses propres

capacités d'exploration. Plus précisément, lorsqu'un expérimentateur, de façon répétée, dévoile la totalité des fonctions d'un jouet, les enfants, confrontés à un jouet nouveau, n'ont plus la curiosité d'en explorer toutes les facettes. On peut donc tuer la curiosité lorsque l'enseignement ne laisse aucun élément à découvrir. Dans la mesure où le signal de récompense lié à la curiosité entre en compétition, au sein du même circuit dopaminergique, avec les récompenses et punitions extérieures, il est également possible de décourager la curiosité en sanctionnant chaque tentative endogène d'exploration par une punition exogène. La punition répétée entraîne un syndrome d'impuissance acquise (*learned helplessness*), associé au stress et à l'anxiété, dont la recherche animale démontre qu'ils inhibent les apprentissages.

Quelles sont les conséquences pédagogiques de ces découvertes ? Le rôle clé de *l'engagement actif* souligne à quel point il importe que l'enfant soit maximalelement attentif, actif, prédictif : plus sa curiosité est grande, plus son apprentissage augmente. Pour maximiser la curiosité, il faut veiller à présenter à l'enfant des situations d'apprentissage qui ne soient ni trop faciles, ni trop difficiles : c'est le principe d'adaptation de l'enseignement au niveau de l'enfant. Afin de préserver l'engagement et la curiosité, l'enseignant doit éviter d'asséner un long cours magistral, mais faire intervenir les enfants, les tester fréquemment, les guider tout en leur laissant découvrir certains aspects par eux-mêmes, et récompenser systématiquement leur curiosité plutôt que de la décourager.

L'importance du *retour d'information*, quant à lui, souligne le statut pédagogique de l'erreur. Enfants et enseignants devraient prendre conscience que, du point de vue des neurosciences cognitives, loin de constituer une faute ou une faiblesse, l'erreur est normale, inévitable même, en tout cas indispensable à l'apprentissage. Mieux vaut un enfant actif qui se trompe et apprend de ses erreurs, qu'un enfant passif et qui n'apprend rien. Ne confondons pas l'erreur (signal informatif) avec la sanction qui ne fait qu'augmenter la peur, le stress, et le sentiment d'impuissance. Les motivations positives et les récompenses modulent l'apprentissage. Notons enfin que le mot « récompense » n'implique aucun retour à un béhaviorisme naïf : chez notre espèce, éminemment sociale, le regard des autres et la conscience de progresser constituent des récompenses en soi.

La consolidation des apprentissages et l'importance du sommeil

Le quatrième facteur clé de l'apprentissage est la consolidation. On appelle ainsi l'automatisation progressive des circuits qui sous-tendent un apprentissage. L'automatisation transfère les connaissances acquises du compartiment conscient vers des circuits spécialisés et non-conscients, libérant ainsi les ressources mentales pour de nouvelles tâches. L'imagerie cérébrale, au cours de la lecture ou du calcul mental, montre qu'au début d'un apprentissage se produit une activation massive des circuits de contrôle exécutif associés au cortex préfrontal. L'attention est fortement mobilisée, et les informations mémorisées sont traitées de façon explicite, consciente, séquentielle, avec effort. Progressivement, cette activité va se réduire, tandis qu'elle augmente dans certaines aires spécialisées des régions postérieures du cerveau. Dans le domaine de la lecture, par exemple, le déchiffrage initial de l'enfant se traduit par une augmentation linéaire du temps de lecture en fonction du nombre de lettres que contient un mot. À mesure que la lecture s'automatise, le temps de lecture s'accélère et devient constant quelle que soit la longueur du mot (entre 3 et 8 lettres). L'enfant peut alors se concentrer sur le sens du texte.

Le *sommeil* apparaît comme l'un des acteurs majeurs de la consolidation des apprentissages. Dès 1924, Jenkins et Dallenbach montrent que le temps de réponse s'accélère après une période de sommeil. Il faudra attendre les travaux de Karni et coll. (1994), puis ceux des équipes de Stickgold, Ribeiro, et Born, pour prouver que, sans aucun entraînement supplémentaire, les performances cognitives et motrices s'améliorent significativement et de façon durable après une période de sommeil, alors que la perturbation du sommeil bloque sélectivement cette consolidation. Les rôles respectifs des différents stades de sommeil ne sont pas encore parfaitement établis, mais il semblerait que le sommeil profond à ondes lentes permette la consolidation et la généralisation des connaissances (mémoire déclarative), tandis que le sommeil paradoxal renforce les apprentissages perceptifs et moteurs (mémoire procédurale).

Chez l'homme, l'imagerie cérébrale montre que, durant le sommeil, les circuits sollicités au cours de l'épisode précédent de veille se réactivent. L'étendue de cette *réactivation* prédit aussi bien le contenu du rêve que la taille de l'effet de consolidation après le réveil. Chez l'animal, l'enregistrement des réponses neuronales démontre que de nombreux neurones, notamment les cellules de lieu de l'hippocampe, se réactivent dans un ordre reproductible au cours du sommeil à ondes lentes. Cette réactivation (*replay*) reproduit la séquence de décharges neuronales observée au cours de l'exploration d'un labyrinthe – parfois à vitesse normale, parfois à l'envers, parfois à une échelle temporelle comprimée d'un facteur 20. Le cerveau rejoue ainsi les patrons d'activité évoqués au cours de la journée, ce qui permet probablement de les recoder dans des circuits additionnels. La fonction principale du sommeil serait le transfert des épisodes d'apprentissage de la veille : l'hippocampe engrangerait les souvenirs de la journée (mémoire rapide) et, au cours de la nuit, la réactivation de ces signaux permettrait d'entraîner des circuits supplémentaires du cortex (mémoire lente capable d'extraire règles et invariants). Selon d'autres théories, le sommeil interviendrait également dans la réduction du nombre des synapses et l'élagage des représentations indésirables (théorie de l'homéostasie synaptique), ainsi que dans la restauration de l'équilibre chimique du système nerveux par échange de métabolites avec le liquide céphalo-rachidien.

Le lien entre sommeil et apprentissage est direct et causal. De nombreuses expériences montrent que les variations spontanées de la profondeur du sommeil, mesurées par le nombre, l'amplitude et la pente des ondes lentes, prédisent les performances après l'éveil. Afin de démontrer une réelle relation de causalité, il est aujourd'hui possible d'augmenter la profondeur du sommeil, soit par l'injection de micro-courants transcrâniens, soit par la présentation d'un bruit diffus synchronisé avec les ondes cérébrales. Dans les deux cas, l'entraînement de l'électro-encéphalogramme (EEG) de sommeil s'accompagne d'une augmentation de la consolidation des apprentissages. Des indices sensoriels, olfactifs ou auditifs, peuvent également réorienter l'apprentissage et conduire à la consolidation sélective des informations associées, pendant la veille, à ces stimuli sensoriels. Notons qu'il ne s'agit en aucun cas d'un apprentissage de stimuli présentés pendant le sommeil (la présentation de connaissances sous forme de bandes magnétiques pendant la nuit n'a aucun effet), mais uniquement d'une réactivation et d'une consolidation de stimuli qui ont été étudiés consciemment avant le sommeil.

Le sommeil peut-il conduire à la *découverte scientifique* ? Cette intuition répandue a fait l'objet d'une démonstration explicite par le groupe de Jan Born (2004). Durant la veille, ils ont présenté des problèmes mathématiques pour lesquels existait

un raccourci caché. Le sommeil entraînait une augmentation très importante du nombre de sujets qui découvraient ce raccourci, alors des groupes contrôle privés de sommeil ne montrent pas d'augmentation, quelle que soit l'heure de la journée à laquelle ils étaient testés. La consolidation nocturne ne se réduit donc pas au simple renforcement des connaissances existantes, mais elle permet leur recodage sous une forme plus abstraite et plus générale.

Quelques expériences démontrent que ces effets sont présents chez l'enfant, où leur ampleur peut être jusqu'à trois fois plus grande que chez l'adulte. Le sommeil de l'enfant est en effet plus profond et plus dense en ondes lentes. Chez l'enfant de 9 à 16 mois, le sommeil nocturne facilite l'apprentissage lexical et la généralisation d'un mot à une catégorie d'images. Chez l'enfant de maternelle, une brève sieste dans l'après-midi présente un effet positif sur l'apprentissage, mais ce bénéfice n'existe que chez les enfants qui font régulièrement la sieste – il ne semble donc pas utile de forcer les enfants à dormir, mais simplement de les laisser dormir s'ils en éprouvent le besoin. Les effets du sommeil semblent particulièrement importants chez les enfants hyperactifs avec troubles de l'attention (*ADHD*) : certains d'entre eux pourraient ne souffrir que d'un manque chronique de sommeil.

Sur le plan éducatif, nous retiendrons que l'amélioration de la durée et de la qualité du sommeil peut constituer une intervention efficace, notamment en cas de trouble des apprentissages. Pour un bénéfice maximal, le sommeil doit survenir dans les heures qui suivent l'apprentissage. Puisque chaque période de sommeil apporte un bénéfice supplémentaire, l'école devrait distribuer au maximum les apprentissages, en les répétant tous les jours si possible. Enfin, la chronobiologie indique que les cycles de sommeil se décalent chez l'adolescent – il est donc justifié de les laisser dormir, quitte à décaler les horaires de la classe.

La mémoire et son optimisation

Le sommeil n'est que l'un des facteurs qui affectent notre mémoire. Celle-ci peut être définie comme l'ensemble des systèmes de projection des informations dans l'avenir. Comme le soulignent Schmidt et Bjork (1992), « l'objectif de l'apprentissage, dans la vie réelle, doit être de maximiser les performances futures et le transfert à des situations nouvelles. [...] Les enseignants croient souvent que les facteurs qui maximisent la performance et la vitesse d'apprentissage pendant l'entraînement permettent d'atteindre ces deux objectifs. Or, toute une série d'expériences indique que cette hypothèse est souvent fautive. » En d'autres termes, enseignants et élèves se trompent parfois radicalement sur les conditions qui optimisent la mémoire.

Dès 1885, Ebbinghaus émet l'hypothèse que l'oubli suit une loi exponentielle en fonction du temps. Cependant, la vitesse de cette décroissance ainsi que son asymptote semblent varier selon les conditions. Quels facteurs déterminent l'oubli ? Un premier élément essentiel est la *profondeur de traitement* des stimuli : à durée d'exposition constante, les mêmes mots seront mieux retenus s'ils ont fait l'objet d'un traitement sémantique profond plutôt que d'un jugement superficiel. Faire l'effort de comprendre un mot ou une phrase facilite son rappel ultérieur. Henry Roediger et ses collaborateurs élèvent ce résultat au rang de principe : « Rendre les conditions d'apprentissage plus difficiles, ce qui oblige les étudiants à un surcroît d'engagement et d'effort cognitif, conduit souvent à une meilleure rétention. » (Zaromb, Karpicke et Roediger, 2010).

Un deuxième facteur important est le fait de *tester régulièrement ses connaissances (retrieval practise)* : se tester régulièrement maximise la performance à long terme. Dans ses *Principes de psychologie* (1890), William James l'avait déjà noté : « Une étrange particularité de notre mémoire est que les faits s'y impriment mieux par une répétition active que passive. J'entends par là que pendant un apprentissage (par cœur, par exemple), lorsque nous sommes sur le point de connaître un passage, il vaut mieux attendre et faire l'effort d'essayer de se souvenir, plutôt que de se précipiter sur le livre. Si nous nous entraînons à récupérer les mots de cette manière, nous nous les rappellerons probablement la prochaine fois ; sinon, nous aurons très probablement besoin d'aller à nouveau regarder le livre. » Effectivement, diverses expériences montrent que le simple fait de mettre à l'épreuve sa mémoire la rend plus forte – sans doute en conséquence directe des principes d'engagement actif et de retour d'erreurs décrits plus haut.

Sur la base d'une revue de la littérature récente, Carrier et Pashler suggèrent que cet effet est maximal lorsque les faits commencent tout juste à être connus, que l'on essaie de récupérer une information et que l'on reçoit un retour immédiat. Ces idées sont à l'origine des *flashcards* des étudiants américains (cartes de révision où l'on écrit la question sur une face et la réponse sur l'autre). De nombreux logiciels, tels *Duolingo* pour l'apprentissage d'une langue étrangère, fonctionnent sur ce principe.

Le troisième facteur déterminant est l'*espacement* des apprentissages. L'apprentissage est dit « distribué » (*spaced*) lorsqu'on répète un item après un certain délai, et « groupé » (*massed*) lorsqu'on présente un même item continuellement ou plusieurs fois de suite pendant une longue période. De nombreuses études montrent qu'à temps total constant, l'apprentissage distribué améliore la rétention en mémoire. C'est particulièrement vrai de la mémoire verbale (apprentissage de phrases, de mots étrangers, etc.), alors que l'effet semble moindre pour l'apprentissage moteur ou dans les domaines plus conceptuels comme les mathématiques. L'imagerie cérébrale montre que le regroupement des problèmes en une seule session diminue l'activité cérébrale. Il pourrait également créer une illusion de savoir (*feeling of knowing*) lié à la présence de l'information en mémoire de travail. Au contraire, l'espacement des problèmes à apprendre augmente l'activité cérébrale qu'ils évoquent et pourrait créer un effet de « difficulté désirable » en interdisant le simple stockage en mémoire de travail, forçant ainsi les circuits sollicités à travailler plus. Il est probable que la consolidation au cours du sommeil nocturne, évoquée plus haut, joue également un rôle dans l'effet d'espacement, dans la mesure où les effets sont particulièrement prononcés lorsque l'apprentissage est répété après un intervalle de 24 heures.

Les travaux d'Hal Pashler tentent de déterminer quel est l'intervalle de temps le plus efficace entre deux répétitions. Ils montrent que cet optimum dépend de l'intervalle de rétention : si l'on souhaite maximiser les performances au bout de quelques jours, une répétition espacée de 24 heures est optimale ; si par contre on souhaite que les connaissances soient préservées plusieurs mois ou plusieurs années, il faut rallonger l'intervalle de répétition en proportion. L'effet est massif : une seule répétition d'une leçon, à un intervalle de quelques semaines, multiplie par trois les scores de mémoire quelques mois plus tard !

Pashler tire de ces travaux plusieurs enseignements pratiques. Premièrement, l'apprentissage gagne toujours à être réparti en plusieurs sessions. Deuxièmement, l'espacement de quelques jours ou même de quelques semaines ne suffit pas – dans le domaine scolaire, où l'on vise la mémorisation à long terme, il faut réviser après

un intervalle de quelques mois au minimum. De ce point de vue, les examens sont utiles : même s'ils incitent à la révision de dernière minute, cette stratégie n'est pas forcément inefficace dans la mesure où l'élève a déjà fait un effort d'apprentissage longtemps auparavant et rafraîchit ainsi ses connaissances de façon durable. Les révisions régulières, et les examens cumulatifs qui y incitent, augmentent considérablement la rétention à l'échelle de plusieurs années. Une révision régulière des connaissances, année après année, entraîne vraisemblablement les plus grands bénéfices pour l'élève.

Plus généralement, l'apprentissage scolaire gagne à tirer parti des trois facteurs qui maximisent la mémoire : la profondeur de l'encodage (faire travailler activement les élèves sur le sens de ce qu'ils apprennent), l'alternance de périodes d'apprentissage et de test (éviter d'exposer les élèves à un cours magistral, mais les mettre à l'épreuve régulièrement) et la répétition à des intervalles espacés. Ces phénomènes sont universels. L'idée répandue selon laquelle chacun dispose d'un style d'apprentissage qui lui soit propre est à reléguer au rang des « neuro-mythes ». Le fait que la plupart des élèves ignorent ces phénomènes et étudient avec des méthodes inefficaces montre également que nous ne pouvons pas nous appuyer uniquement sur nos intuitions pour améliorer l'école. En expérimentant avec les enseignants et les parents, les sciences cognitives peuvent aider le système scolaire à converger vers des pratiques éducatives validées par l'expérimentation (*evidence-based education*, de même qu'il existe une médecine fondée sur la preuve, *evidence-based medicine* en anglais).

Fondements cognitifs de la lecture

Les deux derniers cours ont été consacrés à l'application de ces principes généraux à deux domaines spécifiques de l'enseignement primaire : l'apprentissage de la lecture et du calcul. Dans ces deux domaines, de nombreuses recherches soutiennent l'hypothèse du recyclage neuronal (importance des contraintes imposées par des circuits neuronaux préexistants), l'importance de la plasticité cérébrale et le rôle de l'automatisation.

Dans le cas de la lecture, c'est un circuit impliquant le cortex visuel de l'hémisphère gauche, au sein du sillon occipito-temporal latéral, qui se modifie au cours de l'apprentissage. Il s'y développe une représentation des lettres et de leurs enchaînements pour former des mots écrits. Cette région visuelle joue un rôle de pivot : ses projections, en direction de différents secteurs du lobe temporal, se modifient afin de représenter d'une part les correspondances entre graphèmes et phonèmes (déchiffrage ou voie phonologique de lecture) et, dans un second temps, le passage direct de la chaîne de lettres au sens des mots (voie lexico-sémantique). La comparaison de personnes alphabétisées et non-alphabétisées démontre que les circuits occipito-temporaux de l'hémisphère gauche sont profondément altérés par l'apprentissage de la lecture : le cortex visuel est modifié, y compris dans ses étapes les plus précoces ; la représentation des visages est déplacée ; l'invariance en miroir est légèrement réduite ; et les aires auditives du *planum temporale* voient également leur activité augmenter. De surcroît, au cours des premières étapes de l'apprentissage, les réseaux attentionnels des lobes pariétaux et frontaux sont fortement activés, mais cette contribution s'amenuise au fil de l'automatisation de la lecture, alors que l'activation temporelle augmente.

Ces résultats expérimentaux, doublés de recherches convergentes en psychologie de l'éducation, conduisent à esquisser quelques recommandations pédagogiques que mes collègues et moi avons résumées dans le livre *Apprendre à lire. Des sciences cognitives à la salle de classe* (2011). Toutes les recherches convergent pour souligner l'importance de l'apprentissage explicite du code alphabétique. Les correspondances graphème-phonème doivent être introduites au sein d'une progression rationnelle. Rappelons qu'au départ l'existence même des phonèmes ne va pas de soi pour l'enfant ou l'adulte non-alphabétisé. La combinatoire des lettres et leur lecture dans l'ordre gauche-droite doivent être enseignées explicitement. L'apprentissage de la lecture gagne à être accompagné d'exercices d'écriture ou de tracé des lettres : en ajoutant un code moteur au lexique mental des lettres, ces activités facilitent vraisemblablement la mémoire des correspondances graphème-phonème, et elles réduisent également les confusions en miroir, par exemple entre b et d.

Enfin, si de nombreux travaux démontrent que l'enseignement du code grapho-phonologique est la meilleure stratégie pour parvenir rapidement à une bonne compréhension des mots, des phrases et des textes, il ne fait aucun doute que cette stratégie ne suffit pas : la connaissance de la structure des mots et des phrases constitue un vaste domaine de compétences, essentiel à la lecture adulte, et qui gagne à être enseigné explicitement à l'enfant. De nombreuses difficultés de l'orthographe du français s'expliquent par la morphologie (racines des mots, préfixes, suffixes, terminaisons grammaticales, etc.), qui elle-même se déduit en partie de l'étymologie et de l'histoire de notre langue. Les travaux de Maryse Bianco démontrent qu'un entraînement spécifique à la compréhension des textes, qui attire l'attention sur les indices sémantiques portés par les anaphores, le temps des verbes, la négation, etc., s'avère bénéfique chez les enfants de classe primaire.

Fondements cognitifs de l'arithmétique

La compréhension du nombre et l'apprentissage de l'arithmétique ont également fait l'objet d'importantes études en neurosciences cognitives. Dès le plus jeune âge, les enfants disposent d'un système de perception approximative des grandeurs numériques (*approximate number system* ou ANS) ainsi que d'une disposition à percevoir les tout petits nombres 1, 2, 3 (subitisation ou *subitizing*). Le nombre fait partie des dimensions abstraites qui sont perçues dès la naissance. Le sillon intrapariétal s'active très précocement chez l'enfant de quelques mois, particulièrement dans l'hémisphère droit, et l'imagerie cérébrale chez l'adulte montre qu'il contient une représentation décodable des grandeurs numériques approximatives. Chez le singe, cette région contient une population de neurones accordés à un nombre particulier d'objets, présents avant même tout entraînement.

Un consensus existe sur le fait que ce « sens du nombre », qui préexiste à tout apprentissage, sert de fondation à l'acquisition des symboles pour les nombres. L'IRM fonctionnelle démontre l'activation des régions intrapariétales dès qu'un adulte effectue un calcul symbolique. Quelques rares expériences d'IRM chez l'enfant, menées notamment par le groupe de Daniel Ansari, montrent une augmentation d'activité avec l'âge, particulièrement dans le sillon intrapariétal gauche, accompagné d'un raffinement progressif de la représentation des quantités. Une région nouvellement découverte, l'aire de la forme visuelle des nombres (*visual number form area* ou VNFA), située à la base du gyrus temporal inférieur des deux hémisphères, répond aux nombres écrits en chiffres arabes chez l'adulte éduqué.

Le modèle du triple code fait l'hypothèse que, chez l'adulte, des échanges multidirectionnels entre la VNFA, la représentation pariétale des quantités et la représentation des nombres sous forme verbale sous-tendent la capacité de calcul arithmétique rapide. Chez l'enfant, l'automatisation du calcul mental s'accompagne effectivement d'une augmentation d'activation dans les régions pariétale et temporale inférieures de l'hémisphère gauche. On voit également une diminution massive de l'activité des aires préfrontales : l'automatisation libère les ressources cognitives centrales. Il est aujourd'hui bien démontré que le sens du nombre, présent dès le plus jeune âge, joue un rôle important dans l'apprentissage du calcul : sa précision détermine la vitesse et la facilité avec laquelle les enfants apprennent les nombres et le calcul, et son intégrité est une condition nécessaire à l'apprentissage du calcul normal.

Au-delà de l'arithmétique, quelques données existent également sur l'apprentissage de la géométrie et des mathématiques de haut niveau. Au laboratoire, nous avons mené récemment une étude d'imagerie cérébrale qui suggère que, chez les mathématiciens professionnels, les mêmes aires cérébrales s'activent lors d'une réflexion sur des objets mathématiques de très haut degré d'abstraction et lors de calculs numériques élémentaires. Ces données récentes semblent ainsi valider l'hypothèse d'une construction hiérarchique des représentations mathématiques abstraites, à partir de fondements profondément ancrés dans le sens rudimentaire du nombre que nous héritons de notre évolution.

Quelles conclusions pouvons-nous tirer concernant l'enseignement des mathématiques ? Les enseignants devraient prendre conscience que tous les jeunes enfants, bien avant l'entrée à l'école, possèdent déjà des intuitions proto-mathématiques profondes et abstraites, qui servent de « socle » des apprentissages. L'enseignement des mathématiques doit s'appuyer sur ces intuitions, tout en les formalisant par le biais des symboles écrits et oraux. Le boulier, le comptage sur les doigts, fournissent des supports utiles à ces intuitions. Apprendre à réciter les noms de nombres ne suffit pas : encore faut-il comprendre le sens et le but du comptage, ce qui nécessite l'établissement de liens étroits entre symboles et quantités.

L'apprentissage du calcul exact présente des difficultés pour tous les enfants. Un travail quotidien de mémoire permet de l'automatiser, libérant ainsi les ressources cognitives pour des réflexions mathématiques d'ordre supérieur. Certaines catégories d'enfants présentent probablement un risque particulier de dyscalculie, qu'il est aujourd'hui possible de dépister à l'aide de tests cognitifs simples. Enfin, les jeux numériques, les jeux de plateau, et certains logiciels éducatifs peuvent être utilisés avec succès pour faciliter l'apprentissage de l'arithmétique exact chez l'enfant normal et en difficulté.

Lectures complémentaires

Blakemore S.J. et Frith U. (2005), *The Learning Brain: Lessons for Education*, Wiley-Blackwell.

Dehaene S. (2007), *La bosse des maths, quinze ans après* (seconde édition), Paris, Odile Jacob.

Dehaene S., Dehaene-Lambertz G., Gentaz E., Huron C. et Sprenger-Charolles L. (2011), *Apprendre à lire : Des sciences cognitives à la salle de classe*, Paris, Odile Jacob.

Dumont H., Istance D. et Benavides F., (2010), *Comment apprend-on ? : La recherche au service de la pratique*, Paris, Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE).

Frith U., (2011), *Neuroscience: implications for education and lifelong learning*, <https://royalsociety.org/policy/projects/brain-waves/education-lifelong-learning/>

Klingberg T. et Betteridge N. (2012), *The Learning Brain: Memory and Brain Development in Children*, Oxford University Press.

Meltzoff A.N., Kuhl P.K., Movellan J. et Sejnowski T.J., (2009), « Foundations for a new science of learning », *Science*325(5938), 284-288.

Pasquinelli E., (2014), *Du labo à l'école : science et apprentissage*, Paris, Le Pommier.

Sigman M., Peña M., Goldin A.P. et Ribeiro S, (2014), « Neuroscience and education: prime time to build the bridge », *Nature neuroscience*, 17, 497-502.

Sousa D. (éd.) (2010), *Mind, Brain, and Education: Neuroscience Implications for the Classroom*, Cloutier Tree.

Tokuhama-Espinosa T. (2010), *Mind, Brain, and Education Science: A Comprehensive Guide to the New Brain-Based Teaching*, W.W. Norton & Co.

Séminaire : Les troubles spécifiques des apprentissages et leur remédiation^b

En complément du cours, le séminaire a été consacré aux difficultés d'apprentissage scolaire et aux troubles spécifiques du développement de l'enfant. Sept orateurs sont intervenus pour présenter leurs recherches ainsi que leurs perspectives d'application pratique en remédiation. Nous avons ainsi débattu des sujets suivants :

Mardi 6 janvier : *The auditory temporal processing theory of dyslexia: behavioral and neural evidence*, par Pol Ghesquière, Université catholique de Leuven.

Mardi 13 janvier : *L'enfant dyspraxique : apport des sciences cognitives*, par Caroline Huron, Unité INSERM-CEA de Neuroimagerie cognitive.

Mardi 3 février : *Dorsal Stream Vulnerability: development of attention and visual dorsal-stream deficits*, par Jan Atkinson et Oliver Braddick, Université d'Oxford.

Mardi 10 février : *Diagnosing and remediating the various subtypes of dyslexia*, par Naama Friedmann, Université de Tel Aviv.

Mardi 17 février : *Introduction aux déterminants sociaux de la cognition : recherche fondamentale et application*, par Pascal Huguët, Université d'Aix-Marseille.

Mardi 24 février : *L'architecture génétique des autismes*, par Thomas Bourgeron, Institut Pasteur.

Mardi 3 mars : *L'hypothèse d'une désorganisation temporelle dans la dyslexie*, par Anne-Lise Giraud, Université de Genève.

Autres enseignements

Dans le cadre des échanges internationaux du Collège de France, deux cours et deux séminaires ont été donnés à l'Université Torcuato di Tella, à Buenos Aires, sur le sujet « *Symbols and the brain* » ; cours 1 : *The acquisition of visual symbols*, cours 2 : *The combination of symbols in nested structures*.

b. Les enregistrements audio et vidéo du séminaire sont disponibles sur le site internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/seminar-2014-2015.htm>.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU LABORATOIRE

Parmi les avancées récentes des recherches du laboratoire, cinq grands axes sont ici mis en valeur.

Apprentissage de la lecture

L'année 2015 a vu la conclusion d'un vaste programme de recherches, démarré six ans auparavant à l'aide d'une subvention de l'ANR, et qui consistait à identifier les changements cérébraux et comportementaux induits par l'apprentissage de la lecture. Cette recherche s'appuyait sur la comparaison systématique des performances et des activations cérébrales d'adultes analphabètes (qui n'ont pas eu la possibilité d'aller à l'école et d'apprendre à lire) et d'adultes alphabétisés et ayant atteint des niveaux variables de lecture. Nos travaux se sont appuyés sur des données d'IRM anatomique et fonctionnelle, mais également de comportement et de potentiels évoqués. Plusieurs découvertes ont été faites :

- L'apprentissage de la lecture modifie l'anatomie des connexions cérébrales dans le faisceau arqué de l'hémisphère gauche (Thiebaut de Schotten *et al.*, 2014). Ce faisceau est directement impliqué dans le traitement du langage, et vraisemblablement le passage des graphèmes aux phonèmes. Ce résultat souligne ainsi l'importance de l'apprentissage des correspondances graphème-phonème dans l'apprentissage de la lecture.

- L'apprentissage de la lecture modifie les réponses visuelles précoces du cerveau, telles que nous pouvons les mesurer en potentiels évoqués (Pegado *et al.*, 2014) : l'amplitude des réponses visuelles est nettement plus grande, la latéralisation des réponses aux chaînes de lettres et aux visages est modifiée, et surtout la précision des représentations visuelles, mesurée par l'effet de répétition en orientation normale et en miroir, augmente avec l'apprentissage de la lecture. Ce travail confirme nos résultats antérieurs en IRM fonctionnelle (Dehaene *et al.*, *Science*, 2010), et suggère qu'ils s'expliquent par des modifications du traitement rapide des informations visuelles précoces plutôt que par des altérations de l'attention descendante.

- L'apprentissage de la lecture modifie les performances visuelles. Le seuil de détection d'une forme globale dans du bruit est abaissé chez les personnes qui ont appris à lire. De plus, celles-ci sont légèrement ralenties lorsqu'elles doivent juger que deux images en miroir sont identiques à une symétrie près. Ce résultat important conforte une prédiction de la théorie du recyclage neuronal : en recyclant des aires visuelles anciennes dans l'évolution, l'apprentissage de la lecture entre en compétition avec les capacités visuelles de généralisation en miroir communes à tous les primates. Un travail réalisé en collaboration avec Paulo Ventura, comparant des illettrés et des lecteurs au Portugal, a également démontré que la reconnaissance des visages et des scènes est modifiée par l'apprentissage de la lecture : la capacité analytique de focalisation de l'attention sur les parties des objets s'améliore.

Tous ces résultats ont été publiés dans diverses revues internationales et également résumés dans une vaste revue de la littérature publiée dans *Nature Reviews in Neuroscience* en 2015.

Mécanismes cérébraux de la conscience

Dans le cadre d'un programme financé par le Conseil européen de la recherche (ERC), nous avons poursuivi nos travaux visant à identifier des « signatures de la conscience », c'est-à-dire des marqueurs dont la détection, dans l'activité cérébrale, indiquerait la présence d'un individu conscient. En 2009, avec Tristan Bekinschtein et Lionel Naccache, nous avons proposé un test auditif simple, appelé « test local-global » qui consiste à étudier la progression, dans le cerveau, des signaux évoqués par la violation de régularités auditives. Notre test sépare deux types de réponses cérébrales : des réponses à la nouveauté « locale » évoquée par une note inattendue, qui indiquent un traitement non-conscient (*mismatch negativity* ou MMN), et des réponses plus tardives à la violation globale de la séquence (onde P3 ou P300), dont nous avons suggéré qu'elles reflètent la prise de conscience de la déviation auditive.

Dans une série d'études, nous sommes parvenus à valider cette hypothèse. En particulier, nous avons mené une étude des ondes cérébrales en magnéto-encéphalographie au cours du sommeil, qui a montré que l'onde P3 (et son équivalent en MEG) disparaît soudainement dès que le sujet s'endort et perd conscience, alors que l'onde MMN diminue plus graduellement. Nous avons également étudié les réponses du cerveau sous anesthésie : en IRM fonctionnelle, le singe éveillé montre un équivalent de la réponse P3 globale, avec des activations distribuées qui envahissent diverses régions du cortex frontal, cingulaire, temporal et pariétal – et comme prédit, ces réponses disparaissent très largement au cours de l'anesthésie (thèse de Lynn Uhrig, travaux en cours de publication). Enfin, avec l'équipe de Lionel Naccache à l'hôpital de la Salpêtrière, nous avons étudié ces mêmes réponses chez plusieurs centaines de patients atteints de troubles de la conscience (coma, état végétatif, état de conscience minimale). Nous avons montré que la réponse P3 globale, lorsqu'elle est présente, signale presque à coup sûr la présence d'une conscience résiduelle ou sa récupération prochaine. Inversement, l'absence de cette onde n'indique pas nécessairement l'absence de conscience, car le patient peut avoir perdu des capacités d'audition, d'attention, de mémoire ou d'intégration. Cependant, nous avons découvert d'autres marqueurs, plus faciles à calculer à partir de l'EEG, dont la présence peut servir de « signature de la conscience ». Dans un article paru dans la revue *Brain*, Jean-Rémi King et Jacobo Sitt ont comparé la validité clinique et la valeur prédictive de 94 marqueurs EEG de l'état de conscience.

Décodage des signaux cérébraux

Dans la thèse de Jean-Rémi King, afin de faciliter la détection des signaux conscients et inconscients, nous avons développé une méthode nouvelle d'analyse des signaux d'électro- et de magnétoencéphalographie. Cette méthode consiste à entraîner un algorithme de décodage multivarié qui, partant des enregistrements EEG et MEG, tente de reconstruire un aspect spécifique du stimulus présenté au sujet (par exemple, la position d'une barre sur l'écran). Un nouveau décodeur est entraîné à chaque pas de temps. On obtient ainsi une courbe temporelle qui décrit à quel moment les signaux cérébraux contiennent une information décodable sur tel ou tel aspect du stimulus, et quelle en est la dynamique. De plus, la méthode permet d'évaluer dans quelle mesure le décodeur entraîné au temps t parvient à généraliser aux données acquises à un autre temps t' . Il en résulte une matrice de généralisation

temporelle qui fournit des indices essentiels sur l'organisation temporelle du traitement de l'information dans le cerveau.

Dans un article de revue publié dans *Trends in Cognitive Sciences*, ainsi que dans une série d'expériences originales, Jean-Rémi King a démontré le vaste potentiel de cette technique. Avec Lucie Charles, nous sommes parvenus à décoder les étapes de traitement d'un chiffre masqué et à séparer certaines étapes conscientes d'autres qui correspondaient à un traitement non-conscient des informations visuelles. Avec Moti Salti, nous avons pu décoder la position d'un stimulus visuel, même lorsqu'il demeurait non-conscient, à en suivre la progression dans le cerveau, et à visualiser le surcroît d'activité lié à la prise de conscience.

Mécanismes de la compréhension des nombres

Dans le domaine de la cognition mathématique, Dror Dotan, au cours d'une thèse menée sous la direction de Stanislas Dehaene, a développé un nouveau logiciel capable d'évaluer très finement la dynamique temporelle et les différentes étapes de compréhension d'un nombre, sans pour autant faire appel aux techniques coûteuses de l'imagerie cérébrale. L'idée consiste à mesurer la trajectoire de la main lorsqu'un enfant ou un adulte indique la position d'un nombre sur une ligne numérique orientée dans l'espace. Les données, très détaillées (une trajectoire temporo-spatiale par essai) donnent accès aux étapes successives de la conversion d'un nombre en une quantité et en une position dans l'espace. Une première série d'expériences chez l'adulte et chez l'enfant a été publiée dans *Cognition* en 2013. Un second travail, comprenant également un modèle mathématique de la compréhension des nombres ainsi que des données chez un patient, a été soumis pour publication en 2015, et un troisième article est en cours d'écriture. Nous espérons qu'à l'avenir, ce test permettra de préciser le développement et l'organisation du sens des nombres et de ses pathologies.

Éducation et cerveau

Afin de diffuser les applications des sciences cognitives à l'éducation, le laboratoire a développé plusieurs activités sur internet :

- création du logiciel de jeu éducatif « L'Attrape-Nombres ». Il s'agit d'un jeu fondé sur des principes cognitifs, qui vise à enseigner et à automatiser la compréhension de la base 10 et des nombres à deux chiffres. Avec l'aide d'un financement de la Fondation Bettencourt-Schueller, Dror Dotan a programmé un jeu de qualité professionnelle, mis en ligne sur un site internet dédié qui comprend également de nombreuses informations à destination des parents et des enseignants (www.AttrapeNombres.com). Nous avons également créé un second site consacré à notre jeu précédent, « La course aux nombres », qui a été amélioré et a vu son installation facilitée (www.lacourseauxnombres.com) ;

- création du site internet www.MonCerveauALEcole.com. Ce site se présente comme un intérateur de connaissances, c'est-à-dire une plateforme cohérente de présentation des principaux résultats de neurosciences cognitives pertinents dans le domaine de l'éducation, particulièrement à l'école primaire. Cette plateforme sert également de point d'accès aux jeux éducatifs que nous développons.

Signalons également que, sous la direction de Caroline Huron, le laboratoire a également développé le site *Le Cartable fantastique* (www.cartablefantastique.fr)

qui propose des contenus scolaires adaptés pour les enfants dyspraxiques et des outils de compensation du handicap. Cette activité rencontre un grand succès (plus de 12 000 visites par semaine) et a été récompensée par un prix spécial « La France s'engage » de la présidence de la République (voir <http://lafrancesengage.fr/toutes-les-actions/le-cartable-fantastique>).

Enfin, en complément de ces activités sur Internet, deux réunions d'une journée, à destination des enseignants et des inspecteurs de l'Éducation nationale, ont été organisées au Collège de France, en collaboration étroite avec le ministère de l'Éducation nationale :

– Sciences cognitives et éducation, le 20 novembre 2012.

– L'apport des sciences cognitives à l'école : quelle formation des enseignants ?, le 13 novembre 2014.

Dans les deux cas, l'intégralité des exposés a été mise en ligne sous forme de vidéo de haute qualité sur la plateforme internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/symposium-2014-2015.htm>.

PUBLICATIONS

Articles de recherche

ABBOUD S., MAIDENBAUM S., DEHAENE S. et AMEDI A., « A number-form area in the blind », *Nature Communications*, vol. 6, 2015, 6026, DOI : 10.1038/ncomms7026.

BARTTFELD P., UHRIG L., SITT J.D., SIGMAN M., JARRAYA B. et DEHAENE S., « Signature of consciousness in the dynamics of resting-state brain activity », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 112, n° 3, 20 janvier 2015, 887-892, DOI : 10.1073/pnas.1418031112.

BASIRAT A., DEHAENE S. et DEHAENE-LAMBERTZ G., « A hierarchy of cortical responses to sequence violations in three-month-old infants », *Cognition*, vol. 132, n° 2, août 2014, 137-150, DOI : 10.1016/j.cognition.2014.03.013.

BOUHALI F., THIEBAUT DE SCHOTTEN M., PINEL P., POUPON C., MANGIN J.-F., DEHAENE S. et COHEN L., « Anatomical connections of the visual word form area », *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, vol. 34, n° 46, 12 novembre 2014, 15402-15414, DOI : 10.1523/JNEUROSCI.4918-13.2014.

CHARLES L., KING J.-R. et DEHAENE S., « Decoding the dynamics of action, intention, and error detection for conscious and subliminal stimuli », *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, vol. 34, n° 4, 22 janvier 2014, 1158-1170, DOI : 10.1523/JNEUROSCI.2465-13.2014.

DEHAENE S., CHARLES L., KING J.-R. et MARTI S., « Toward a computational theory of conscious processing », *Current opinion in neurobiology*, avril 2014, vol. 25, 76-84, DOI : 10.1016/j.conb.2013.12.005.

DEHAENE S., COHEN L., MORAIS J. et KOLINSKY R., « Illiterate to literate: behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition », *Nature Reviews. Neuroscience*, vol. 16, n° 4, avril 2015, 234-244, DOI : 10.1038/nrn3924.

DEHAENE S., MEYNIEL F., WACONGNE C., WANG L. et PALLIER C., « The neural representation of sequences: From transition probabilities to symbolic rules and linguistic trees », *Neuron special issue*, 2015, vol. in preparation.

EL KAROU I., KING J.-R., SITT J., MEYNIEL F., VAN GAAL S., HASBOUN D., ADAM C., NAVARRO V., BAULAC M., DEHAENE S., COHEN L. et NACCACHE L., « Event-Related Potential, Time-frequency, and Functional Connectivity Facets of Local and Global Auditory

Novelty Processing: An Intracranial Study in Humans », *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 26 juin 2014, DOI : 10.1093/cercor/bhu143.

HANNAGAN T., AMEDI A., COHEN L., DEHAENE-LAMBERTZ G. et DEHAENE S., « Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex », *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 19, n° 7, juillet 2015, 374-382, DOI : 10.1016/j.tics.2015.05.006.

HUNG Y.-H., PALLIER C., DEHAENE S., LIN Y.-C., CHANG A., TZENG O.J.-L. et WU D.H., « Neural correlates of merging number words », *NeuroImage*, 28 juillet 2015, DOI : 10.1016/j.neuroimage.2015.07.045.

KING J.-R. et DEHAENE S., « A model of subjective report and objective discrimination as categorical decisions in a vast representational space », *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, vol. 369, n° 1641, 5 mai 2014, 20130204, DOI : 10.1098/rstb.2013.0204.

KING J.-R. et DEHAENE S., « Characterizing the dynamics of mental representations: the temporal generalization method », *Trends in cognitive sciences*, vol. 18, n° 4, avril 2014, 203-210, DOI : 10.1016/j.tics.2014.01.002.

KING J.-R., GRAMFORT A., SCHURGER A., NACCACHE L. et DEHAENE S., « Two distinct dynamic modes subtend the detection of unexpected sounds », *PLoS one*, vol. 9, n° 1, 2014, e85791, DOI : 10.1371/journal.pone.0085791.

MARTI S., BAYET L. et DEHAENE S., « Subjective report of eye fixations during serial search », *Consciousness and Cognition*, 8 décembre 2014, [PMID: 25497406], vol. 33C, 1-15, DOI : 10.1016/j.concog.2014.11.007.

MARTI S., THIBAUT L. et DEHAENE S., « How does the extraction of local and global auditory regularities vary with context? », *PLoS One*, vol. 9, n° 9, 2014, e107227, DOI : 10.1371/journal.pone.0107227.

MEYNIEL F., SCHLUNEGGER D. et DEHAENE S., « The Sense of Confidence during Probabilistic Learning: A Normative Account », *PLoS computational biology*, vol. 11, n° 6, juin 2015, e1004305, DOI : 10.1371/journal.pcbi.1004305.

PEGADO F., COMERLATO E., VENTURA F., JOBERT A., NAKAMURA K., BUIATTI M., VENTURA P., DEHAENE-LAMBERTZ G., KOLINSKY R., MORAIS J., BRAGA L.W., COHEN L. et DEHAENE S., « Timing the impact of literacy on visual processing », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 111, n° 49, 9 décembre 2014, E5233-E5242, DOI : 10.1073/pnas.1417347111.

PEGADO F., NAKAMURA K., BRAGA L.W., VENTURA P., NUNES FILHO G., PALLIER C., JOBERT A., MORAIS J., COHEN L., KOLINSKY R. et DEHAENE S., « Literacy breaks mirror invariance for visual stimuli: a behavioral study with adult illiterates », *Journal of Experimental Psychology. General*, vol. 143, n° 2, avril 2014, 887-894, DOI : 10.1037/a0033198.

PINEL P., LALANNE C., BOURGERON T., FAUCHEREAU F., POUAPON C., ARTIGES E., LE BIHAN D., DEHAENE-LAMBERTZ G. et DEHAENE S., « Genetic and Environmental Influences on the Visual Word Form and Fusiform Face Areas », *Cerebral Cortex*, 13 mai 2014, DOI : 10.1093/cercor/bhu048.

SALTI M., MONTO S., CHARLES L., KING J.-R., PARKKONEN L. et DEHAENE S., « Distinct cortical codes and temporal dynamics for conscious and unconscious percepts », *ELife*, vol. 4, 2015, DOI : 10.7554/eLife.05652.

SCHURGER A., SARIGIANNIDIS I., NACCACHE L., SITT J.D. et DEHAENE S., « Cortical activity is more stable when sensory stimuli are consciously perceived », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 112, n° 16, 21 avril 2015, E2083-E2092, DOI : 10.1073/pnas.1418730112.

SITT J.D., KING J.-R., EL KAROUTI I., ROHAUT B., FAUGERAS F., GRAMFORT A., COHEN L., SIGMAN M., DEHAENE S. et NACCACHE L., « Large scale screening of neural signatures of consciousness in patients in a vegetative or minimally conscious state », *Brain*, vol. 137, Pt 8, août 2014, 2258-2270, DOI : 10.1093/brain/awu141.

STRAUSS M., SITT J.D., KING J.-R., ELBAZ M., AZIZI L., BUIATTI M., NACCACHE L., VAN WASSENHOVE V. et DEHAENE S., « Disruption of hierarchical predictive coding during sleep », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 112, n° 11, 17 mars 2015, E1353-E1362, DOI : 10.1073/pnas.1501026112.

SZWED M., QIAO E., JOBERT A., DEHAENE S. et COHEN L., « Effects of literacy in early visual and occipitotemporal areas of Chinese and French readers », *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 26, n° 3, mars 2014, 459-475, DOI : 10.1162/jocn_a_00499.

THIEBAUT DE SCHOTTEN M., COHEN L., AMEMIYA E., BRAGA L.W. et DEHAENE S., « Learning to read improves the structure of the arcuate fasciculus », *Cerebral Cortex*, vol. 24, n° 4, avril 2014, 989-995, DOI : 10.1093/cercor/bhs383.

UHRIG L., DEHAENE S. et JARRAYA B., « A hierarchy of responses to auditory regularities in the macaque brain », *The Journal of neuroscience*, vol. 34, n° 4, 22 janvier 2014, 1127-1132, DOI : 10.1523/JNEUROSCI.3165-13.2014.

WANG L., UHRIG L., JARRAYA B. et DEHAENE S., « Representation of Numerical and Sequential Patterns in Macaque and Human Brains », *Current biology*, vol. 25, n° 15, 3 août 2015, 1966-1974, DOI : 10.1016/j.cub.2015.06.035.

Livres

Le Code de la conscience, Paris, Odile Jacob, 2014 ; traductions en anglais (*Consciousness and the Brain : Deciphering How the Brain Codes Our Thoughts*, Penguin Viking), Allemand (*Denken*, Knaus, 2014), italien (*Coscienza e cervello*, Raffaello Cortina.), espagnol (*La conciencia en el cerebro*, Siglo XXI, 2015), chinois (à paraître), etc.

AUTRES ACTIVITÉS

Distinctions

En 2014, Stanislas Dehaene a reçu le Prix de la revue LiRE du meilleur livre de sciences de l'année 2014 pour *Le Code de la Conscience*. Ses travaux ont été récompensés par le *Grete Lundbeck Brain Prize* (avec G. Rizzolatti et T. Robbins). Il a également reçu le *Mind & Brain Prize* de l'université de Turin. Il a été élu membre de l'*EMBO (European Molecular Biology Organization)*, ainsi que de l'Académie royale des Sciences et des Arts de Belgique. Ses publications ont été reconnues par la distinction *Thomas Reuters Highly Cited Researcher*. En 2015, Stanislas Dehaene a également reçu le *Distinguished Scientific Contribution Award* de l'*American Psychological Association*.

Principales conférences invitées

Conférencier invité à l'Académie des sciences d'Israël, Jérusalem, 17 février 2014.

The Heller lectures (two invited lectures on Reading and Consciousness). université hébraïque de Jérusalem (Israël), 25-27 février 2014.

« Understanding Consciousness: from the lab to the clinic ». conférence publique invitée, Association for the Scientific Study of Consciousness annual meeting, Brisbane (Australie), 19 juillet 2014.

« Temporal decoding of MEG signals: a window into conscious and non-conscious operations », Keynote lecture, ICON meeting, Brisbane (Australia), 30 juillet 2014.

« Brain and literacy », conférence invitée, UNESCO International conference on reading and dyslexia, Belo Horizonte (Brésil), 18-20 août 2014.

« How do monkeys and humans represent the abstract structure of sequences », conférence invitée, université de Tokyo (Japon), 6 décembre 2014.

« The brain mechanisms underlying mathematical intuition », conférencier invité, Friedrich Miescher Institute (FMI), Bâle (Suisse), 22 janvier 2015.

« Decoding the time course of conscious and unconscious operations ». conférence inaugurale à l'International Convention of Psychological Science (ICPS), Amsterdam, 3 mars 2015.

Soutenance de thèses

Catherine Wacongne, « Neuronal modeling of conscious and unconscious metacognition », université Paris 6, 2010-2014.

Lynn Uhrig, « Cerebral mechanisms of general anesthesia », université Paris 6, 2009-2014.

Jean-Rémi King, « Decoding conscious and non-conscious mental states », université Paris 6, 2010-2014.

Participation aux programmes nationaux et internationaux

Responsabilité du pilier « Architectures cognitives » du *Human Brain Project*, projet « Flagship » de la Communauté européenne, financé pour dix ans, et visant à développer des simulations du cerveau humain.

Participation au comité de sélection du Prix international Kavli en neurosciences.