HAL
open science

Neurosciences et éducation : la bataille des cerveaux

Marie Gaussel, Catherine Reverdy

To cite this version:

Marie Gaussel, Catherine Reverdy. Neurosciences et éducation : la bataille des cerveaux. Dossier de veille de l'IFÉ, 2013, 86, http://ife.ens-lyon.fr/vst/DA/detailsDossier.php?parent=accueil&dossier=86&lang=fr. hal-01657230

HAL Id: hal-01657230

https://hal.science/hal-01657230v1

Submitted on 6 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INSTITUT FRANÇAIS DE L'ÉDUCATION
AGENCE QUALITÉ ÉDUCATION

n° 86
Sept. 2013

Sommaire

● **Page 2 :** Ce qu'apportent les neurosciences à la compréhension des processus d'apprentissage ● **Page 13 :** Le cerveau à l'école ? ● **Page 22 :** Les neurosciences cognitives, un outil sollicité malgré tout ● **Page 30 :** Vers une nouvelle culture scientifique en éducation ? ● **Page 33 :** Bibliographie.

Dossier d'actualité
VEILLE ET ANALYSES

NEUROSCIENCES ET ÉDUCATION : LA BATAILLE DES CERVEAUX

Ce dossier inhabituel par son volume peut être lu à plusieurs niveaux, les encadrés constituant soit un apport spécialisé (certains sont développés dans des articles publiés sur Éduveille), soit plus spécifiquement une illustration des croyances autour du cerveau, les neuromythes (également regroupés dans un article de blog). Vous trouverez ici la présentation de ce dossier ainsi qu'une liste des articles qui lui sont liés.

Nous tenons à remercier Bernard Lahire et Franck Ramus pour leurs conseils avisés.

Par Marie Gaussel et Catherine Reverdy

Chargées d'étude et de recherche au service Veille et Analyses de l'Institut français de l'Éducation (IFÉ)

À la croisée des recherches sur le cerveau et des sciences de l'apprentissage, les neurosciences de l'éducation s'invitent aujourd'hui dans la salle de classe. Sont-elles capables de rendre les pratiques enseignantes plus efficaces et d'aider les élèves à mieux apprendre ? Le débat suscite des passions autour des immenses potentialités évoquées dans de nombreux projets de recherche dédiés à l'amélioration des méthodes d'apprentissage, pour lesquelles la focale serait faite sur le fonctionnement du cerveau. **Neurosciences de l'éducation**, **esprit, cerveau et éducation** ou encore **neuro-éducation**, le vocabulaire ne manque pas pour désigner cette « jeune science », dont l'objectif est de mieux faire connaître le cerveau et les processus cognitifs qui lui sont attachés. La fascination qu'exerce sur la société tout ce qui a trait au cerveau est sans doute à l'origine des financements colossaux investis en neuroscience, comme par exemple le *Human Brain Project* européen ou le *Brain initiative* américain lancé par Obama et illustré par le site du *Human Connectome Project*, une base de données et d'images sur les circuits neuronaux.

Interrogeant le point de vue qui considère les neurosciences de l'éducation comme une science qui va radicalement bouleverser nos manières d'apprendre, voire d'enseigner, nous avons souhaité dans ce dossier mettre en perspective ce que l'on sait aujourd'hui sur les **relations entre cerveau et école**.

Toutes les références bibliographiques citées dans ce Dossier sont accessibles sur notre bibliographie collaborative.

CE QU'APPORTENT LES NEUROSCIENCES À LA COMPRÉHENSION DES PROCESSUS D'APPRENTISSAGE

Avant de faire le point sur les résultats des recherches en neurosciences concernant l'apprentissage, il est nécessaire d'apporter quelques éclairages sur le développement récent des neurosciences cognitives et la manière dont elles sont appréhendées et définissent l'apprentissage. Après la description du fonctionnement de la mémoire (ou plutôt des mémoires) à la base de l'apprentissage, les résultats des recherches liés à l'éducation seront abordés, sans souci d'exhaustivité mais avec une attention portée à la cohérence scientifique de ces résultats.

L'ESSOR DES NEUROSCIENCES COGNITIVES

Depuis 50 ans, les neurosciences se sont considérablement développées grâce aux progrès techniques permettant des mesures indirectes très précises de l'activité de notre cerveau (ou de celui des animaux). Parallèlement, les sciences cognitives, avec la théorie du traitement de l'information (modèle considérant l'esprit humain comme un système complexe traitant les informations perçues), sont devenues la discipline étudiant le fonctionnement de la connaissance humaine ou artificielle, mais « *en conservant des contours flous* » (Chamak, 2011).

Neurosciences ou sciences cognitives ?

L'histoire des neurosciences est fondée avant tout sur celle du neurone. Suite à la mise en place en 1891 par Waldeyer du concept de **neurone** comme cellule nerveuse, une branche de la physiologie expérimentale, la neurophysiologie, est créée en Angleterre dans les années 1930. Une première bataille (ce ne sera pas la seule) oppose les tenants de la physiologie nerveuse et ceux de la physiologie neuronale jusqu'à ce que la neurobiologie s'impose dans les années 1950 (en orientant les recherches sur le niveau cellulaire et non plus sur les circuits nerveux), ce qui aboutira à la naissance en 1969 des **neurosciences**, par la création de la société américaine de neurosciences (son pendant français date de 1988). « *Le champ disciplinaire "neurosciences" concerne l'étude du fonctionnement du système nerveux depuis les aspects les plus élémentaires : moléculaires, cellulaires et synaptiques jusqu'à ceux, plus intégratifs, qui portent sur les fonctions comportementales et cognitives* » (voir le site du CNRS).

Les neurosciences ont historiquement commencé par l'étude des fonctions mentales affectées par une pathologie, en partant de l'hypothèse de Gall, au début du XIXe siècle, qui postule que le cerveau est séparé en différents organes contrôlant chacun une des facultés de l'esprit. Cette idée correspondant à la **localisation cérébrale** (à une fonction mentale correspond une zone du cerveau) est aujourd'hui encore très présente dans les recherches, même si les scientifiques penchent plutôt actuellement sur l'hypothèse qu'une fonction mentale provient de la coopération de plusieurs neurones organisés en réseaux, non toujours placés au même endroit du cerveau (Tiberghien, 2002).

Quelques chiffres (CERI, 2007) :

- environ 90 milliards de neurones dans le cerveau humain ;
- de 1 à plus de 100 000 synapses par neurone ;
- en moyenne 7 000 dendrites par neurone ;
- 1 axone par neurone ;
- entre 1 000 et 10 000 connexions entre neurones, et 1 000 signaux par seconde, soit pour le cerveau entier, cent millions de milliards de signaux par seconde ;
- près de 250 000 neurones formés toutes les minutes pendant les quatre premiers mois de gestation ;
- entre 20 et 30 % des connexions sont faites à la naissance.

Un peu de neurologie pour mieux comprendre

Les **sciences cognitives** ou sciences de la cognition forment une discipline à la jonction des neurosciences, de la psychologie, de la linguistique et de l'intelligence artificielle (certains ajoutent l'anthropologie, la philosophie ou l'épistémologie, voir Varela, 1997), et qui appartient donc à la fois aux sciences naturelles et aux sciences humaines (Tiberghien, 2002). La notion de **cognition** est à la base des sciences cognitives. Elle date du milieu du XXe siècle et désigne la fonction biologique produisant et utilisant la connaissance. Elle comporte des modes de fonctionnement (appelés mécanismes, procédures, processus, algorithmes) de différente nature qui sont traités par des modules spécialisés et contrôlés. Du point de vue des sciences cognitives, les neurosciences sont un domaine parmi d'autres d'étude de la cognition, tout comme la **psychologie cognitive**. [1]

Les **neurosciences cognitives** peuvent donc être définies comme l'« *ensemble des disciplines qui ont pour objet d'établir la nature des relations entre la cognition et le cerveau* » (Tiberghien, 2002). Pour aller plus loin, Chamak (2011) réalise une synthèse historique de la naissance des sciences cognitives et aborde les différentes disciplines concernées (voir aussi Dworczak, 2004 ; Écalle & Magnan, 2005).

> *« Les sciences cognitives sont définies comme un ensemble de disciplines scientifiques visant à l'étude et à la compréhension des mécanismes de la pensée humaine, animale ou artificielle, et plus généralement de tout système cognitif, c'est-à-dire tout système complexe de traitement de l'information capable d'acquérir, de conserver et de transmettre des connaissances. Elles reposent donc sur l'étude et la modélisation de phénomènes aussi divers que la perception, l'intelligence, le langage, le calcul, le raisonnement ou même la conscience. »* (Centre d'analyse stratégique, 2010)

La neuro-imagerie à la base du développement des neurosciences cognitives

Les progrès faits ces toutes dernières années en neuro-imagerie nous donnent l'illusion de voir l'activité du cerveau en temps réel, ce qui ouvre la voie à de nombreuses spéculations.

Une méthode très employée en neuro-imagerie est la méthode soustractive : on compare deux tâches différentes réalisées par une même personne et impliquant ou non un processus mental donné et on observe les aires du cerveau qui montrent des différences d'activation entre ces deux tâches. L'hypothèse est alors de considérer que ce sont ces aires cérébrales qui sont impliquées dans le processus mental testé. [2]

En neurosciences cognitives, seules les méthodes non invasives d'imagerie sont utilisées. Ce sont des méthodes indirectes impliquant la mesure : [3]

- de l'activité électrique ou magnétique du cerveau, avec l'électroencéphalographie (EEG) et plus particulièrement les potentiels évoqués [4] (PE ou ERP en anglais pour *event-related potential*) et la magnéto-encéphalographie (MEG) ;
- de l'afflux sanguin, avec l'imagerie par résonance magnétique nucléaire fonctionnelle (IRMf) et la tomographie par émission de positons (TEP ou PET *scan* en anglais).

Les techniques d'imagerie cérébrale

Toutes ces techniques nécessitent de

[1] S'opposant à l'origine au béhaviorisme par l'introduction du principe de traitement de l'information et en postulant qu'il existe des relations causales entre les représentations mentales et les réseaux neuronaux du cerveau, la psychologie cognitive permet l'essor des sciences cognitives. Avec la neuro-imagerie, les neurosciences cognitives prennent le pas sur la psychologie cognitive.

[2] Ceci reste une **hypothèse non vérifiée actuellement** (voir par exemple l'hypothèse d'une désactivation des aires cérébrales dans le récent article de Kubit & Jack, 2013), nous y reviendrons par la suite.

[3] Pour des explications plus détaillées, voir par exemple « Les méthodes d'étude du cerveau » sur le site du laboratoire ACCES de l'IFÉ ou le laboratoire Magnéto-encéphalographie de l'Université de Montréal, ou encore, davantage orientés vers la médecine, le cours de Canal U : « Dessine-moi un cerveau » et le rapport du Sénat n° 476 : « L'impact et les enjeux des nouvelles technologies d'exploration et de thérapie du cerveau » (Claeys & Vialatte, 2012).

[4] Un **potentiel évoqué** se définit comme la modification de l'activité électrique du système nerveux en réponse à une stimulation extérieure, qu'elle soit visuelle, auditive, sensitive ou motrice. L'enregistrement des potentiels évoqués renseigne sur le fonctionnement de la voie stimulée. Les différents types de potentiels évoqués utilisés en routine clinique sont les potentiels évoqués visuels (PEV), les potentiels évoqués auditifs (PEA), les potentiels évoqués somesthésiques (PES), les potentiels évoqués laser (PEL), les potentiels évoqués moteurs (PEM), voir le site de la Fédération française de neurologie).

lourds traitements calculatoires pour « reconstruire » une image à partir de ces mesures indirectes ❶, et donc des compétences et une formation spéciales pour l'interprétation des images obtenues (Claeys & Vialatte, 2012). Les conditions expérimentales, surtout en IRMf et en MEG, sont souvent drastiques et les expériences onéreuses.

La combinaison des différentes techniques, qui se révèlent souvent complémentaires, donne des résultats de plus en plus probants pour une même expérience ❷. Certaines techniques classiques de neurosciences sont également utilisées pour confirmer des résultats ou débuter des expérimentations : neurochirurgie, études sur des lésions cérébrales qui empêchent une activité cognitive (notamment grâce à la stimulation magnétique transcranienne), autopsies, études invasives ou non sur les animaux, etc.

Le **cortex**, écorce en latin, est la couche superficielle du cerveau (sa surface est de 2 000 cm2, mais son épaisseur ne dépasse pas quelques millimètres, voir l'animation 3D de l'université Claude Bernard-Lyon 1). Il est divisé en six couches et replié sur lui-même en de nombreuses circonvolutions formant des sillons. Les sillons profonds de quelques centimètres divisent le cerveau en 5 **lobes**. Des parties du cortex, appelées zones ou **aires cérébrales** motrices ou sensorielles, correspondent à la fonction du même nom. Pour plus de détails sur les autres organes du cerveau, voir le site « Le cerveau à tous les niveaux » (financé jusqu'il y a peu par l'Institut des neurosciences, de la santé mentale et des toxicomanies du Québec).

COMMENT LES NEUROSCIENCES DÉFINISSENT-ELLES L'APPRENTISSAGE ?

Du point de vue neuroscientifique, la forme la plus élémentaire de l'apprentissage est la réaction cérébrale d'un individu à un stimulus, une nouveauté : l'information est perçue, traitée et intégrée. L'acquisition de cette information est matérialisée par des modifications structurelles au sein des réseaux cérébraux. De façon plus détaillée, Meyer et Rose (2000) nous proposent une classification des réseaux impliqués dans la transformation de l'information en connaissance : le réseau de la reconnaissance, le réseau stratégique et le réseau affectif. Le premier (situé dans les lobes occipital, pariétal et temporal) traite les informations issues de l'environnement et les organise. Le second (situé dans le lobe préfrontal) planifie et coordonne les actions en fonction du but ; le dernier (situé au niveau du système limbique) gère les émotions liées à l'apprentissage, telles que la motivation, l'intérêt ou le stress. Tous travaillent ensemble et sont composés de cellules spécialisées : les neurones et les cellules gliales (Hinton & Fischer, 2010).

Les cellules gliales : indispensables à la survie et au fonctionnement des neurones

Les présupposés de l'apprentissage incluent également l'idée que l'on se fait des notions d'intelligence, de mémoire et de performance. Nous nous attacherons, en prenant le point de vue neuroscientifique, à relier ces concepts à ce que l'on sait du fonctionnement du cerveau.

La place du cerveau dans l'apprentissage

Au sein de la communauté des neurosciences, un large groupe d'experts s'accorde à penser que les processus d'apprentissage s'opèrent selon le principe

❶ Pour l'EEG par exemple, comme le bruit de fond (dû notamment au clignement des yeux) brouille le signal, les tests sont répétés de nombreuses fois pour que l'expérimentateur puisse faire la moyenne des signaux mesurés (et ceci en général sur plusieurs sujets). Pour l'IRMf, les coupes du cerveau obtenues sont comparées à celles d'un cerveau standard avant d'être combinées pour obtenir une image en 3D qui évolue dans le temps.

❷ Signalons au passage le développement de **nouvelles techniques** moins lourdes et moins coûteuses comme l'imagerie spectroscopique proche infrarouge (ISPIf ou fNIR), qui mesure la réflexion optique de la lumière infrarouge par l'hémoglobine ou la mesure du signal optique évoqué (EROS en anglais), qui mesure très précisément les changements des propriétés optiques du cortex. Mais ces méthodes ne permettent pas l'exploration du cerveau à plus de quelques centimètres de profondeur.

connexionniste : pour que l'information (sous forme de stimulus) soit retenue, les réseaux synaptiques se modifient en créant de nouvelles connexions entre les neurones. C'est la **plasticité synaptique**. Cette modification des connexions est exécutée selon deux processus principaux : la potentialisation à long terme (LTP) et la dépression à long terme [1] (LTD).

Alors que les chercheurs ne sont pas capables aujourd'hui d'observer « en direct » la plasticité synaptique liée aux processus cognitifs, ils pensent néanmoins que ce mécanisme est nécessaire à l'apprentissage, mais sans être certains que la plasticité ne repose que sur l'adaptation du réseau synaptique [2].

On distingue par ailleurs deux types de plasticité :

- la plasticité intrinsèque : les enfants, comme les petits des animaux, ont besoin de faire certains types d'expériences à des moments donnés de leur développement. Il s'agit d'un « moyen de réglage » naturel, quel que soit l'environnement, permettant le développement des comportements et des compétences propres à l'espèce. C'est le cas de l'audition, de la vision, du mouvement, du langage, de la mémoire de base ;
- la plasticité extrinsèque : activée tout au long de la vie, elle correspond à l'apprentissage des compétences transmises socialement, comme la musique, les échecs, l'arithmétique, la lecture.

Une autre caractéristique principale de l'activité cérébrale est la **connectivité fonctionnelle**. Geake (2008) distingue plusieurs structures impliquées dans les processus d'apprentissage :

- la mémoire de travail (lobe frontal latéral) ;
- la mémoire à long terme (hippocampe et d'autres aires du cortex) ;
- la prise de décision (lobe orbitofrontal) ;
- la médiation émotionnelle (lobe limbique et d'autres aires du lobe frontal) ;
- la représentation symbolique (gyrus fusiforme et lobes temporaux) ;
- les interrelations conceptuelles (lobe pariétal) ;
- la répétition moteur et conceptuelle.

Pour le chercheur, c'est bien l'ensemble de ces structures cérébrales qui sont sollicitées en permanence dans les tâches d'apprentissage et qui sont nécessaires à notre **intelligence générale**.

Le concept d'intelligence(s)

Possédons-nous une ou plusieurs formes d'intelligence ? Nos capacités sont-elles fixées dès la naissance ou notre intelligence est-elle mobile et évolutive ? Ces questions, à l'origine de nombreux débats, sont capitales pour les représentations sociales de l'intelligence et leurs conséquences à l'école. Selon Crahay (2010), si l'élève (et ses parents) adopte la conception d'un potentiel inné, sa réussite montrera son intelligence alors que ses échecs traduiront une incapacité définitive. À l'inverse, l'élève conscient de l'altérabilité de ses capacités traduira un échec comme le fruit d'une stratégie d'apprentissage inappropriée et non pas comme un signe de non-intelligence. On peut affirmer aujourd'hui que la notion d'une intelligence innée et figée est dépassée car elle ne rend pas compte de la plasticité synaptique. Pour Crahay (2010), ce terme d'« intelligence » est d'ailleurs désuet et lui préfère celui de « cognition » qui traduit mieux l'idée d'une **potentialité individuelle** de départ modelée par l'environnement psychosocial.

Les théories neuroscientifiques soutiennent d'ailleurs que le développement du cerveau est la conséquence des interactions entre l'organisation cérébrale de base (génétique) et l'environnement (l'acquis). Le concept d'intelligence et les méthodes de calcul de quotient intellectuel (QI) ont souffert des avancées en neurosciences car on leur reproche d'être trop restrictifs et de ne pouvoir rendre compte des capacités de tous les individus. Geake dénonce à ce propos la théorie des **intelligences multiples** avancée par Gardner en 1993, qui ignore les principes de connectivité fonctionnelle mis en avant par les chercheurs. Il réaffirme en effet la simplification exces-

[1] La LTP est la capacité d'un neurone à s'adapter, à changer ses réseaux synaptiques face à l'information reçue (sous la forme de signaux). De mini-réseaux sont formés et organisés de façon à retenir l'information. À l'inverse, la LTD indique une perte d'efficacité des réseaux synaptiques mais qui est liée à l'habituation ou la capacité à reconnaître un stimulus devenu habituel. L'efficacité de la LTP et la LTD est corrélée à celle de l'apprentissage (Howard-Jones, 2008).

[2] Voir aussi Arshavsky (2006) et Squire (2004).

sive de la vision de Gardner qui divise les capacités cognitives en sept types d'intelligence car selon lui « *there are no multiple intelligences, but rather, it is argued, multiple applications of the same multifaceted intelligence* » (Geake, 2008). Néanmoins, la notion d'intelligence générale (nommée « g » dans les travaux de recherche), serait bien la résultante des corrélations entre les performances des différentes régions cognitives. Ramus (2012) dit à ce sujet que « *l'intelligence générale est […] une propriété émergente, résultant de la cascade des facteurs environnementaux, génétiques, cérébraux et cognitifs qui influent sur la performance aux différents tests* ». Le QI ne reflèterait donc pas une propriété biologique mais donnerait une indication statistique sur les multiples capacités cognitives d'un individu.

L'intelligence artificielle

L'EXEMPLE DES SYSTÈMES DE MÉMOIRES

En neurosciences, on l'a vu, le terme « mémoire » est souvent employé comme synonyme d'apprentissage, qui se traduit dans le cerveau par un changement des connexions entre neurones (plasticité synaptique). Trois grandes périodes peuvent être distinguées parmi les étapes qui ont jalonné l'étude de la mémoire. La première, à la fin du XIXe siècle, a permis de mettre en évidence quelques principes relatifs à la nature composite de la mémoire (consciente ou inconsciente, explicite ou implicite). Puis, à partir de la Première Guerre mondiale, le béhaviorisme domine la psychologie scientifique et les chercheurs s'intéressent plus aux mécanismes de conditionnement et d'apprentissage qu'aux processus de la mémoire. Enfin la troisième période, des années 1980 à nos jours, est marquée par l'avènement de l'imagerie cérébrale qui permet d'étudier les zones concernées par les systèmes de mémoire (d'après l'entretien d'Eustache dans *Les dossiers de la recherche* de 2006).

Pour apprendre, il faut mémoriser. Comment la mémoire fonctionne-t-elle ?

Pour Eustache, la mémoire est formée de cinq systèmes [1] : une **mémoire à court terme** ou **de travail**, une mémoire à long terme plus complexe comprenant une **mémoire procédurale** (mémoire des automatismes), une **mémoire perceptive** (identifie des stimulus), une **mémoire sémantique** (mémoire des connaissances générales sur le monde au sens large, sur les concepts), une **mémoire épisodique** (la plus sophistiquée, la mémoire des souvenirs). Ces mémoires travaillent en interaction et non pas de façon isolée, elles ne sont pas figées car elles se modifient au fil du temps et des expériences. Ce vaste réseau permet de créer l'information en transformant des souvenirs en éléments sémantiques.

Le concept de **mémoire de travail** est défini par Eustache et Desgranges (2010) comme « *un **système mnésique** responsable du traitement et du maintien temporaire des informations nécessaires à la réalisation d'activités aussi diverses que la compréhension, l'apprentissage et le raisonnement. Ce modèle postule l'existence de deux sous-systèmes satellites de stockage (la boucle phonologique et le calepin visio-spatial) coordonnés et supervisés par une composante attentionnelle, l'administrateur central* ». La mémoire de travail recouvre aujourd'hui le concept de **mémoire à court terme** car elle ne se contente pas d'être une voie de passage temporaire des informations sensorielles vers la mémoire à long terme, elle est également un espace de travail entre l'environnement et la mémoire à long terme. À cet espace s'ajoute un troisième système de stockage, le « ***buffer*** » **épisodique**, un tampon qui traite et oriente les informations multimodales provenant de différentes sources.

Nos multiples mémoires

[1] « *Nous parlons de systèmes de mémoire pour insister sur leur grande complexité : ils résultent de l'assemblage organisé d'une multitude de mécanismes neuronaux et de processus mentaux. Tous les systèmes de mémoire sont des sous-systèmes de l'ensemble "cerveau-esprit", qui est lui-même le plus complexe de tous les systèmes que nous connaissons.* » (Tulving dans un entretien accordé à *La Recherche* en 2009)

La mémoire de travail permet de retenir et de réutiliser une quantité limitée d'informations pendant un temps relativement court, environ 30 secondes (cela varie en fonction des individus). Le codage en mémoire à court terme est de nature phonologique et généralement limité par l'empan mnésique à 7 éléments ❶ (plus ou moins 2) et correspond à la capacité de concentration. La mémoire de travail fonctionne un peu comme une « **mémoire fichier** ». Elle sert à stocker brièvement des éléments qui permettent un accès sémantique dans la mémoire à long terme. Par exemple, pour l'apprentissage de la lecture et donc la compréhension des phrases, la capacité de la mémoire de travail est déterminante. Elle reste relativement invariable mais sa qualité dépend du degré de connaissances antérieures dans le domaine étudié (Lieury, 2012).

❶ *Magic seven* : le psychologue américain George Miller a déterminé en 1956 que le nombre moyen d'éléments retenus (mots, phrases, images...) dans la mémoire de travail était de 7 (plus ou moins 2). Le regroupement de ces éléments en petits morceaux (*chunks*) augmente la capacité de stockage de la mémoire et facilite la restitution.

La **mémoire à long terme explicite** (appelée déclarative ou consciente) est composée de la mémoire épisodique et de la mémoire sémantique. La mémoire épisodique se caractérise par le souvenir de l'expérience subjective d'un évènement passé. L'individu prend conscience de son existence et de son point de vue unique *via* un voyage mental dans le temps et l'espace. La mémoire sémantique qui sert à gérer les mots, les concepts, les savoirs, englobe la notion de « conscience noétique » ou conscience de l'existence du monde et des objets qui le composent. Cette mémoire est celle que l'on utilise pour l'apprentissage car elle « gère » les évènements quotidiens. Alors que la mémoire déclarative nous permet de stocker et récupérer les données, la mémoire non déclarative s'exprime plus par la performance ou l'exécution que par le souvenir (Howard-Jones, 2008).

La **mémoire à long terme implicite** (également appelée non déclarative ou inconsciente) inclut la **mémoire procédurale** et le **système de représentations perceptives**. La mémoire procédurale permet d'acquérir des savoir-faire, de les stocker et de les reproduire. Les procédures mises en œuvre sont automatiques et difficilement accessibles à la conscience. L'apprentissage ne se limite cependant pas à la mémoire procédurale car il met en synergie plusieurs systèmes cognitifs dont la mémoire de travail et les mémoires explicites (Eustache & Desgranges, 2010).

Le processus de mémorisation

Le processus de mémorisation se déroule selon trois grandes étapes : l'**encodage** ou l'acquisition de l'information, la **rétention** ou le stockage de l'information, la **récupération** ou l'actualisation. L'encodage est le processus initial qui permet, grâce à des représentations mentales, de conserver les caractéristiques essentielles des informations à retenir, celles sélectionnées par l'individu. La rétention permet d'oublier ce qui a été mémorisé et de libérer de l'espace dans la mémoire de travail. Cette étape est riche en termes de traitement des items à mémoriser car il s'agit d'une transformation ou d'une reconstruction des éléments. La dernière étape de récupération permet à l'individu de mettre en œuvre ou de restituer ce qu'il a acquis. Cette dernière phase implique généralement trois types de processus mnémoniques : un processus de rappel, une conduite de reconnaissance et une conduite de réapprentissage (Cordier & Gaonac'h, 2004).

La récupération est capitale pour la mémorisation et peut facilement s'effectuer dans un contexte scolaire sous forme de tests par exemple. Roediger et Butler (2011) montrent à ce propos comment l'effort conscient de récupération de l'information dans la mémoire est bien plus efficace que des lectures successives ou les répétitions orales ; elle aurait même un effet mnémonique. Autrement dit, l'interrogation régulière des élèves sur le contenu du cours donne de meilleurs résultats qu'un apprentissage « par cœur ».

Mémoire malléable ou apprendre en dormant ?
« Comment améliorer votre mémoire ? » : cette formule publicitaire fleurit en général à l'approche des examens scolaires ou pour accompagner la vente de produits de parapharmacie censés nous aider à développer nos capacités de mémoire et, par analogie, nos capacités intellectuelles. L'étude des processus mémoriels a montré que la mémoire est composée de plusieurs systèmes et qu'elle n'est pas située à un point unique du cerveau. On sait également qu'elle n'est pas infinie et que la capacité d'oubli est indispensable à une bonne mémorisation. Il existe des techniques pour améliorer sa mémoire mais elles opèrent sur certains types de mémoires seulement et chez certains individus. Par exemple, le niveau d'expertise dans un sujet donné influe sur la zone activée lors de la mémorisation : ce ne sera pas la même zone selon que le sujet est expert ou novice. Ce qui aide à développer la mémoire, à diminuer les risques de maladies dégénératives et que les chercheurs ont démontré pour l'instant est :

- l'exercice physique (Hillman *et al.*, 2008 ; Winter *et al.*, 2007 ; CERI, 2007) ;
- le sommeil (Rasch *et al.*, 2006 ; Howard-Jones, 2010a), qui joue un rôle dans le processus d'encodage et de consolidation des informations, mais aucune théorie scientifique ne montre qu'on peut apprendre quoi que ce soit en dormant.

L'organisation des informations dans la mémoire

Ce processus nécessite une **hiérarchisation** des éléments ou une **catégorisation** qui facilite la mémorisation et l'apprentissage. Cette organisation a des conséquences sur le fonctionnement de la mémoire et en particulier sur le codage des informations [1]. La profondeur de traitement dépend de la nature de l'activité de codage ou d'encodage (la transformation de l'information en trace mnésique) qui a été utilisée pour la retenir. Mais ce travail d'encodage ne suffit pas. Van der Linden (2003) dit à ce propos : « *l'encodage et la récupération en mémoire épisodique et autobiographique sont sous l'influence des buts et plans actifs de la personne ainsi que du caractère émotionnel des informations à encoder ou récupérer* ».

Des études ont également montré que les processus d'apprentissage s'accompagnent le plus souvent d'un **déplacement de l'activité au sein des réseaux du cerveau**, d'autant plus que l'information est maîtrisée : plus on devient compétent dans un exercice, plus les informations sont orientées vers une zone de traitement plus automatique et moins la zone de mémoire de travail est sollicitée (Varma & Schwartz, 2008). Cette théorie est partagée par Cordier et Gaonac'h (2004) qui expliquent que « *plus le matériel est traité en profondeur, plus ce traitement comporte d'associations, de relations de signification entre les items à apprendre et les connaissances stockées antérieurement à la tâche, et meilleur sera le recouvrement ultérieur de l'item* ».

Les **représentations mentales** imagées aident également l'individu à se remémorer un objet qui n'est pas présent dans son champ perceptif. Cette formation d'images correspond à un épisode psychologique qui restitue une apparence figurative à l'objet sous une forme généralement simplifiée, « *ainsi, l'image possèderait des propriétés structurales héritées de la perception, d'où son nom de représentation ana-*

[1] L'imagerie fonctionnelle cérébrale d'ailleurs a permis d'étudier séparément les régions du cerveau qui jouent un rôle dans le processus d'encodage et de récupération, en particulier pour diagnostiquer un déficit. Voir le site Mapping memory du *National Geographic* qui présente la carte des lésions cérébrales atteintes dans les maladies dégénératives.

logique » (Cordier & Gaonac'h, 2004). Les mots concrets qui favorisent la production d'images mentales facilitent d'ailleurs la mémorisation, au contraire des termes représentant un concept abstrait. L'expression « ***double codage*** » fait allusion à l'utilisation d'un **codage verbal** renforcé par un **codage visuel** qui, même si l'effort cognitif est initialement plus important, permet de restituer plus facilement une information.

Le mythe des 10 % d'utilisation du cerveau
Les origines de ce mythe restent floues. Certains disent qu'il fait référence aux travaux d'un neurochirurgien italien qui, vers la fin du XIXe siècle, traitait ses patients en leur enlevant des petits bouts de cerveau afin de mieux déterminer les causes de leur maladie. D'autres attribuent à Albert Einstein la paternité de cette expression quand il s'était moqué d'un journaliste en lui faisant remarquer que le niveau de ses questions laissait à penser qu'il ne devait utiliser que 10 % de son cerveau. L'absurdité d'une telle idée a été pointée par Beyerstein dans un article du *Scientific American* en 2004 et, parmi les millions de travaux effectués sur le cerveau, personne n'a jamais trouvé une portion non utilisée. La plasticité du cerveau n'est possible que parce que nous utilisons toutes nos connexions dynamiquement. Une utilisation de 10 % de notre cerveau correspondrait d'ailleurs à un état végétatif. L'imagerie cérébrale et la neurochirurgie confirment que le cerveau est actif à 100 % et que l'ensemble des zones cérébrales, primaires et secondaires, est en interaction.

LES DOMAINES IMPACTÉS

Les systèmes de mémoires jouent donc un rôle important dans les processus d'apprentissage et chaque individu aurait les moyens de développer des capacités à n'importe quel âge. Comment appréhender ces connaissances pour mieux les utiliser dans un contexte d'enseignement ? Nous souhaitons traiter ici quelques avancées en neurosciences pouvant avoir des impacts sur le quotidien des apprenants, en nous limitant aux domaines dont les recherches sont les plus abouties.

L'apprentissage des langues

Nous séparons ici ce qui concerne l'apprentissage du langage oral, qui se fait « *naturellement durant l'enfance par simple exposition* » (CERI, 2007) et l'apprentissage du langage écrit qui nécessite un apprentissage spécifique, intentionnel.

Acquisition du langage et développement du cerveau

Les neuroscientifiques se sont intéressés très tôt à l'acquisition du langage puisque les premiers travaux sur le cerveau, réalisés notamment par Broca à la fin du XIXe siècle, concernent avant tout ce domaine. Par l'étude de patients aphasiques ❶, Broca a mis en évidence une aire cérébrale responsable des processus langagiers (le gyrus frontal inférieur gauche). Wernicke a montré quelques années plus tard l'existence d'une autre aire fonctionnelle liée au traitement sémantique et qui porte désormais son nom (il s'agit du gyrus temporal postérieur gauche). Ces aires sont situées pour la majorité des gens dans l'hémisphère gauche ❷.

Ces résultats ont été confirmés par les méthodes de neuro-imagerie, notamment par celle des potentiels évoqués, qui permet l'analyse des « *processus très rapides et automatisés qui interviennent dans la compréhension des mots ou des phrases* » (Kail, 2012). On a découvert récemment le rôle fondamental d'une troisième aire (dite de Geschwind), qui se

❶ C'est-à-dire à la base muets, mais le terme a pris une définition spécifique en désignant « *la perte partielle ou totale de la faculté de s'exprimer, et de comprendre le langage, qu'il soit parlé ou écrit, malgré l'intégrité anatomique et fonctionnelle des organes de la phonation (langue, larynx) et indépendamment de toute atteinte neurologique d'origine sensorielle (sans difficultés d'audition ou de vue)* » (selon la définition du site Vulgaris médical).

❷ Voir les illustrations des sites « Le cerveau à tous les niveaux » et « Approche neurosensorielle du langage oral » de l'université de Montpellier 2.

développe de façon plus tardive que les autres chez les nourrissons et qui pourrait traiter simultanément les fonctions différentes d'un même mot (aspect visuel, fonction, nom, etc.). Une autre découverte faite à partir de l'étude de lésions spécifiques du cerveau est la contribution inattendue de l'hémisphère droit dans la compréhension précoce du langage, c'est-à-dire lors de l'explosion lexicale et des débuts de la mise en place de la grammaire à la fin de la deuxième année ❶.

On sait également que le processus de synaptogénèse joue un rôle fondamental dans l'acquisition du langage : de nombreuses connexions sont fabriquées durant la première année de vie, puis une élimination sélective a lieu les années suivantes, sous l'influence de l'expérience ❷. Il existerait une période dite sensible (et non critique) de quelques années pour le développement du langage, puisque les nourrissons sont capables de distinguer des sons très différents d'*a priori* toutes les langues, ce qu'ils ne font plus vers 10 mois lorsque l'imprégnation culturelle est suffisante pour qu'ils se concentrent sur leur seule langue maternelle (CERI, 2007).

❶ Cela soulève la question de « *quand et dans quelles conditions l'hémisphère gauche fait son entrée pour finalement devenir l'hémisphère dominant du traitement du langage* » (Kail, 2012).

❷ Voir dans la troisième partie de ce dossier « Le cas de la petite enfance ».

Le mythe des périodes « critiques »
Dire que l'on ne peut plus apprendre certaines choses après un certain âge se révèle aujourd'hui un neuromythe. De nombreuses études ont montré que le cerveau restait plastique tout au long de la vie grâce à la synaptogénèse (développement et modification des connexions) et la neurogénèse (création de neurones). Or, l'acquisition de compétences et l'apprentissage se font avec le renforcement des connexions et par l'élagage (*pruning*) de certaines autres. Deux types de synaptogénèse se complètent : la première, celle qui se produit au début de la vie (apprentissage avant l'expérience) et la seconde qui est la conséquence de l'exposition à l'environnement et à des expériences complexes (apprentissage dépendant de l'expérience). Le principe de « fenêtres d'opportunités » telles que décrites par Lorenz, dans son étude sur l'attachement du poussin à l'objet mobile dominant lors de l'éclosion, ne peut s'appliquer aux hommes (CERI, 2007).
Les recherches ont mis en évidence des périodes dites « **sensibles** » et non pas « **critiques** ». S'il est vrai que le développement synaptique est particulièrement intense entre 0 et 3 ans puis, dans une mesure moindre, jusqu'à 10 ans, il n'existe aucune preuve démontrant que le nombre de synapses soit lié à la qualité ou à l'amplitude de l'apprentissage. De plus, même si certains neurones changent de taille avec l'âge, des chercheurs ont également constaté que certaines zones du cerveau continuaient à produire des neurones. C'est le cas de l'hippocampe qui joue un rôle essentiel dans le processus de mémoire spatiale (Petit, 2006).

Apprentissage d'une langue étrangère

Pour les langues étrangères, la question est différente : l'apprentissage d'une langue étrangère ne consiste pas « *à réinitialiser le processus inné qui préside à l'acquisition de la langue maternelle* » (Forlot & Beaucamp, 2008). Il s'agit donc d'apprendre une nouvelle langue (et notamment sa grammaire) forcément différemment, soit en mobilisant les aires fonctionnelles déjà utilisées par la langue maternelle (pour les plus jeunes enfants, avant 3 ans), soit en en mobilisant d'autres, éventuellement dans l'autre hémisphère pour les plus âgés. Il semble

que la première solution soit plus propice pour l'apprentissage d'une langue étrangère, puisqu'elle se rapproche ainsi de l'acquisition « simple » du langage. Cependant les stratégies d'apprentissage, notamment pour ceux qui ont déjà appris une langue étrangère ou pour les adultes, sont beaucoup mieux maîtrisées dans le deuxième cas et l'apprentissage peut se révéler assez efficace (CERI, 2007).

Des pistes de recherche actuelles comparent les activations cérébrales qui ont lieu lors de l'apprentissage des langues et lors de celui de la musique ou du langage des signes, et étudient également de près le cas particulier du bilinguisme et du phénomène d'immersion dans une langue.

L'apprentissage de la littératie

Ce que l'on nomme dans un même terme de littératie englobe les processus d'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Comme l'apprentissage de la littératie n'est pas biologiquement prévu, il n'y a pas *a priori* de structures cérébrales dédiées, mais les aires cérébrales (et les réseaux neuronaux) reliées au langage sont naturellement fortement mobilisées lors de cet apprentissage, ainsi que celles reliées à la vision, l'audition et à la compréhension du sens des mots. La majorité des études de ce domaine portent sur la lecture et utilisent principalement l'IRMf et l'EEG pour l'étude temporelle des processus phonologiques.

La compréhension des phénomènes dans ce domaine [1] s'arrête pour l'instant au niveau de la lecture des mots, non des phrases (quelques études commencent à apparaître sur ce sujet). Une des théories actuelles qui semble s'imposer est la **théorie des deux voies** : après reconnaissance visuelle des mots par le lobe visuel primaire et un traitement prélexical par la jonction occipito-temporale gauche, le traitement de l'information suit l'une ou l'autre des deux voies complémentaires : par assemblage (conversion graphophonologique, voie indirecte) ou par adressage (passage direct du traitement prélexical à la compréhension sémantique, voir CERI, 2007). D'un point de vue orthographique, toutes les langues n'ont pas la même « transparence » (pour l'italien, par exemple, à chaque phonème correspond une orthographe unique), ce qui aurait une incidence sur la voie utilisée préférentiellement. Le niveau de complication de l'orthographe d'une langue pourrait en effet jouer un rôle direct sur la stratégie de lecture adoptée par les individus, et donc sur leur processus cérébral de traitement. Un modèle universel pour l'acquisition de la lecture, fonctionnant donc pour toutes les langues, est encore actuellement un objet d'étude et de débat [2] (Szwed *et al.*, 2012).

Par ailleurs, certains chercheurs évoquent une « aire de la forme visuelle des mots » (ou *visual word form area*) à la jonction entre les lobes occipital et temporal, dans le cortex visuel [3] (voir notamment Dehaene, 2007 ; Szwed *et al.*, 2012). Cette aire, responsable à la base de la reconnaissance des visages ou des formes géométriques, se recyclerait lors de l'apprentissage de la lecture dans la reconnaissance visuelle des mots écrits [4]. Goswami (2008b) recense quant à elle au moins 12 aires cérébrales impliquées dans la reconnaissance des mots et précise que, pour la lecture comme pour le langage, l'hémisphère gauche joue un rôle de plus en plus prépondérant au fur et à mesure du développement de l'enfant.

Les études sur le sujet portent actuellement sur les non-mots (que se passe-t-il dans le cerveau lorsqu'on voit un mot qui n'existe pas), la détection des rimes, les modèles computationnels de lecture, et bien entendu la dyslexie, champ très prolifique dans la recherche en neurosciences (voir la troisième partie de ce dossier).

La perception des nombres

Comme la littératie, la numératie naît des interactions entre biologie et expérience. Les structures de bases sont génétiquement programmées mais l'utilisation de ces structures passe par un travail de coordination de plusieurs circuits neuronaux non dédiés aux mathématiques. Cette « reconversion neuronale » dépend principalement d'éléments issus de l'environnement. C'est pourquoi on s'interroge actuellement sur la possibilité d'élaborer une « **pédagogie des mathématiques** » à l'aide des connaissances neuroscientifiques (CERI, 2007).

[1] Un dossier précédent (Feyfant & Gaussel, 2007) fait le point sur l'apprentissage de la lecture et ses difficultés, suite au débat houleux de 2006 sur les méthodes de lecture les plus efficaces.

[2] Voir également les 33 autres articles de chercheurs commentant l'article « Towards a universal model of reading » de Frost (2012).

[3] Une étude portant sur le « *sens orthographique des babouins* » confirmerait cette hypothèse de recherche (Grainger *et al.*, 2012).

[4] Cependant les fonctions attribuées à cette zone ne sont pas complètement élucidées actuellement, et plusieurs hypothèses coexistent (pour une étude spécifique sur cette aire, voir Cai, 2009).

On pense aujourd'hui que les jeunes enfants possèdent un sens inné des nombres allant de 1 à 3 (au-delà, le langage est nécessaire), quelques jours après leur naissance, avant toute éducation formelle. De nombreux neuroscientifiques considèrent que l'enseignement des mathématiques devrait s'appuyer sur l'**intuition numérique** des élèves. Ceci étant, ils reconnaissent également que les méthodes jouent un rôle sur le développement du cerveau : l'**apprentissage par répétition** n'est pas mémorisé par les circuits neuronaux de la même façon que l'**apprentissage par stratégie**. Ces découvertes jouent également un rôle important sur la récupération des connaissances par les élèves et donc sur les résultats des évaluations (Berteletti *et al*., 2010).

Mobiliser des réseaux neuronaux différents pour résoudre une même tâche, c'est également le principe du modèle présenté par Dehaene *et al*. (2003) qui met en relation fonctionnements cognitifs et structures cérébrales. Leur théorie postule l'existence de trois types de représentations, chacun associé à des fonctions spécifiques et à une localisation dans une aire cérébrale (rendue visible grâce aux techniques d'imagerie). La région étudiée est celle du lobe pariétal, reconnue pour être le siège de la numératie mais également des fonctions verbales, spatiales et d'attention. La **représentation analogique** correspond à la sémantique des nombres. Elle permet des calculs approximatifs et des comparaisons. Elle est présente dans les deux hémisphères au niveau du sillon intrapariétal et est désignée métaphoriquement comme une « ligne numérique » (*number line*). La **représentation verbale**, associée à une localisation dans l'hémisphère gauche, se réfère aux formes verbales, auditives mais aussi d'écriture des nombres en lettres. Elle s'occupe de la mémorisation verbale des quantités et du calcul mental (opérations simples) et de leur stockage.

Enfin, la **représentation arabe**, associée aux aires occipito-temporales des deux hémisphères, traite la résolution d'opérations complexes (Fayol, 2012).

La créativité et les arts

Le terme de créativité est souvent employé pour définir la capacité de produire « quelque chose » à la fois original, utile, pratique ou esthétique. La croyance sociale confond d'ailleurs souvent créativité et intelligence et qualifie de « don » toute manifestation de talent. Pour les neuroscientifiques, la créativité est l'expression d'un comportement alternatif, d'une façon de penser différente ❶. Ces idées impliquent que d'autres connexions entre neurones se développent dans des aires différentes du cerveau et que la créativité nécessite des capacités souvent associées au lobe frontal, siège de la mémoire de travail et de l'attention. Ces suppositions, étudiées par IRMf (Stewart *et al*., 2003), se sont révélées pertinentes pour des recherches portant sur la lecture de partitions musicales qui transformait la traduction d'un code spatial (la partition) en une série de réponses moteur (par exemple les doigts sur le clavier pour un pianiste). L'expression artistique en particulier (musicale, théâtrale, littéraire) possèderait la qualité de stimuler l'ensemble des circuits neuronaux associés à l'apprentissage, l'innovation et l'imagination ❷. Certains chercheurs proposent donc de développer son enseignement mais également de l'utiliser comme un moyen transdisciplinaire d'apprendre ❸ (Sousa, 2010). L'expression de la créativité est donc perçue comme un objet d'étude précieux pour les neuroscientifiques : Stewart et Williamon (2008) considèrent que l'étude de l'apprentissage de la musique et des performances musicales permet de comprendre comment les individus acquièrent et intègrent les capacités cognitives, moteur, perceptives et sociales nécessaires à l'écoute et/ou à l'expression musicale.

❶ J.-P. Changeux parle d'une « *créativité des processus cognitifs cérébraux* ». Voir aussi sa vision de l'épigénétique (l'étude des influences de l'environnement cellulaire ou physiologique sur l'expression de nos gènes, Changeux, 2002).

❷ « *Chez les pianistes, on observe un épaississement des régions spécialisées dans la motricité des doigts ainsi que dans l'audition et la vision. De plus, ces changements sont directement proportionnels au temps consacré à l'apprentissage du piano pendant l'enfance.* » (Vidal, 2011)

❸ Howard-Jones (2010a) décrit à ce propos des expériences sur l'adoption d'une stratégie créative.

Le mythe du cerveau gauche et du cerveau droit
Cette opposition tire son origine des premières recherches en neurophysiologie au XIXe siècle qui distinguaient deux types de capacités cognitives et les attribuaient à un hémisphère : les aptitudes créatrices et synthétiques et les aptitudes critiques et analytiques. Jusqu'aux années 1960, la latéralisation des hémisphères était basée sur l'étude *post-mortem* de cerveaux avec lésions. Les techniques d'imagerie cérébrale montrent aujourd'hui, et de façon encore plus visible chez des individus ayant subi une opération de division hémisphérique (en cas d'épilepsie sévère), que l'ensemble des tâches cognitives est effectué de façon bilatérale et que les deux hémisphères travaillent bien ensemble même s'il existe des asymétries fonctionnelles (CERI, 2007). Chez les individus « normaux », les deux hémisphères reliés par le corps calleux (une sorte d'autoroute de l'information) sont en interaction continue pour la majorité des tâches à exécuter. Des études ont également montré que des lésions du corps calleux entraînaient une déficience dans l'apprentissage du langage, déficience impossible si l'hémisphère gauche était seul en charge du développement du langage. Il serait presque « dangereux » de penser que le traitement du langage se situe uniquement dans l'hémisphère gauche chez tous les humains selon Thierry *et al*. (2003), d'autant plus que « *human brain function and behaviour seem best explained on the basis of functional connectivity between brain structures rather than on the basis of localization of a given function to a specific brain structure* » (Walsh & Pascual-Leone, 2003). Ce mythe semble cependant perdurer malgré une abondante littérature sur la modularité du cerveau et la localisation variable de ces modules selon les individus. Les pseudo-outils éducatifs suggérant un entraînement cérébral possible pour développer l'hémisphère « faible » sont le produit d'une extrapolation, voire d'une distorsion de données neuroscientifiques à des fins commerciales (Geake, 2008 ; Lindell & Kidd, 2011).

LE CERVEAU À L'ÉCOLE ?

Comment appliquer les théories neuroscientifiques dans un environnement scolaire ? Doit-on instruire tous les enseignants dans ce domaine ? Comment rendre l'environnement des élèves riche et socialement bénéfique ? Peut-on vraiment élaborer des pédagogies plus efficaces grâce aux connaissances neuroscientifiques ? Les ponts ne semblent pas encore bien construits pour passer du laboratoire à la salle de classe, une des nombreuses raisons reposant sur les différences entre les méthodes d'investigation.

Cité par Eisenhart et DeHaan (2005), le rapport *Scientific Research in Education* (National Research Council, 2002) précise les six conditions qui devraient préalablement faire partie du cahier des charges de toute recherche, *a fortiori* en éducation :

- pouvoir la relier à des méthodes de recherche empiriques ;
- lier la recherche aux théories pertinentes ;
- utiliser des méthodes d'investigation directe ;
- détailler et expliquer la chaîne de raisonnement ;
- répéter et généraliser les résultats des enquêtes ;
- rendre les recherches publiques afin de favoriser les échanges professionnels et les critiques.

Avec ce canevas en tête, observons les études de neurosciences cognitives qui proposent d'utiliser directement ou indirectement leurs méthodes en classe et la réaction du monde de l'enseignement face à l'engouement que cela provoque.

QUAND LE CERVEAU FASCINE TROP

À l'époque de la phrénologie (XVIIIe siècle), qui est une théorie du neurologue Franz Josef Gall, les médecins et les biologistes étudiaient le cerveau humain en se repérant à la forme des bosses du crâne, censée refléter la personnalité et les capacités intellectuelles. C'est la taille du cerveau qui fut ensuite un objet d'étude, grâce à l'influence des chercheurs tels que Broca, qui défendait la thèse selon laquelle le degré d'intelligence serait corrélé au volume des organes encéphaliques [1] (Vidal, 2011).

Neurophilie, neuromanie, neurocharabia

La **neurophilie** ou la fascination du cerveau a pour origine l'attraction du public profane pour toute information contenant des éléments neuroscientifiques légitimant à ses yeux les résultats de la recherche. Selon Trout (2008), citant les travaux de Skolnick Weisberg *et al*. (2008), la plupart des personnes non expertes acceptent plus facilement les théories qui reposent sur des faits neuroscientifiques, comme si elles avaient plus de valeur. Pour le Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé qui évoque un « déficit conceptuel » de ces théories, les images cérébrales traduisent en effet des changements dans l'activité des neurones, mais sans préjuger du contenu du message ou d'un état mental du sujet étudié, ou d'une psychologie déterminée, qui restent à interpréter par d'autres méthodes et qui ne se réduisent pas à l'activité cérébrale observée [2] (Agid & Benmakhlouf, 2011). Ce type d'**information** « **placébique** » largement utilisé dans les médias peut malheureusement contribuer à la naissance et la prolifération de fausses théories.

Le vocabulaire technique de l'information neuroscientifique placébique active chez les non-experts des représentations conceptuelles qui semblent cohérentes et donc acceptées comme véridiques quelle que soit leur pertinence dans le contexte donné. Quand on ajoute à cela les effets d'un visuel représentant le cerveau, les théories neuroscientifiques sont perçues comme d'autant plus plausibles (McCabe & Castel, 2008). Dès lors, l'enthousiasme important des décideurs politiques pour la neuro-imagerie, l'engouement d'un public en demande de solutions fiables [3], des hypothèses scientifiques (mêmes réfutées par la suite) répandues et relayées par les médias et leur exploitation politique et économique, engendrent des « **neuromythes** [4] » préjudiciables pour l'enseignement (Pasquinelli, 2012).

Un environnement enrichi favorise le développement du cerveau
L'influence des environnements enrichis sur le développement cérébral a principalement été testée chez les rats en stimulant les animaux en introduisant de nouveaux objets de type roue ou tunnel dans leur cage. Les observations ont montré que les premières expériences des rats sont susceptibles d'augmenter le nombre de synapses de 25 %. Ces recherches visent à découvrir comment un environnement complexe agit sur la plasticité cérébrale, comment le cerveau se souvient des expériences vécues et quelle est la nature des mécanismes neuronaux impliqués. Les avis des chercheurs diffèrent : pour certains l'apprentissage est le fruit d'un élagage (des synapses sont éliminées), pour d'autres les synapses déjà existantes sont renforcées. Enfin, pour les derniers, l'apprentissage s'appuie sur la création de synapses qui permettent le stockage de nouvelles informations. Aujourd'hui, rien ne prouve qu'un environnement enrichi pour les enfants entraîne automatiquement une augmentation du capital neuronal. À l'inverse, les effets d'un environnement très appauvri sont mieux reconnus et peuvent provoquer des carences dans le développement cognitif des rats et des humains (Howard-Jones, 2010a).

[1] Cette hypothèse ne serait pas encore validée aujourd'hui puisque des méta-analyses ont trouvé une corrélation (de 0,33) entre le volume du cerveau et les performances aux tests d'intelligence (voir par exemple McDaniel, 2005).

[2] « *La fascination pour le pouvoir de la neuroimagerie est telle que le concept de "lecture de l'esprit" ou "mind-reading" est proposé comme un concept opératoire. Dans la mesure où l'image ne peut être niée comme peut l'être une proposition discursive, on a tendance à lui prêter une interprétation intrinsèque alors qu'elle suppose une compétence et des règles d'interprétation, compétence et règles qu'elle ne véhicule pas directement* » (Agid & Benmakhlouf, 2011).

[3] « *Le succès de ces théories simplistes, qui expliquent tous nos comportements, par la biologie, tient au fait qu'elles sont finalement rassurantes. Elles nous donnent l'illusion de comprendre et de se sentir moins responsables de nos actes* » (Vidal, 2011).

[4] « *Croyances battues en brèche par la science mais largement répandues et relayées, par divers vecteurs, dans l'esprit du profane* » (CERI, 2002).

L'exemple du *brain-based learning* (apprentissage basé sur le fonctionnement du cerveau)

L'apprentissage basé sur le fonctionnement du cerveau, très en vogue depuis les années 1990, repose sur les principes de fonctionnement du cerveau. Cette théorie part du postulat que, puisque notre cerveau nous sert à apprendre, alors il faut savoir comment notre cerveau fonctionne et surtout comment lui faire « plaisir ». Les neurosciences de l'éducation font de nombreux disciples, car elles affichent le double objectif de proposer des méthodes pédagogiques efficaces applicables en classe et d'expliquer le fonctionnement cognitif du cerveau lors des processus d'apprentissage.

À ce propos, Goswami (2008a) identifie six principes d'apprentissage pouvant être utilisés dans les salles de classe :

- l'apprentissage est basé sur l'expérience et fonctionne par incrémentation ;
- l'apprentissage est multi-sensoriel ;
- les mécanismes cérébraux de l'apprentissage structurent des informations isolées pour construire des concepts génériques ;
- l'apprentissage est social ;
- l'apprentissage est modulé par l'émotion, l'intention, le stress ;
- le cerveau est plastique tout au long de la vie.

Très enthousiasmés par ces principes énoncés, les partisans du *brain-based learning* suggèrent d'augmenter l'attention et la mémorisation (rétention) des élèves en créant un environnement apaisant, propice aux échanges et intellectuellement stimulant.

Bruer (2002) souligne à ce propos qu'il n'y a rien de nouveau dans cette idée puisqu'elle emprunte ces hypothèses aux modèles cognitifs et constructivistes étudiés par la psychologie depuis plus de 30 ans ; aucune preuve sur l'efficacité de telle ou telle pédagogie ne résulte à ce jour des théories neuroscientifiques.

Pour illustrer ce principe et ses dérives possibles, examinons le concept ***Brain Gym***, la gymnastique du cerveau, qui promet à ses adeptes un apprentissage facilité par l'adoption d'exercices physiques ciblés. Mise au point par Paul et Gail Dennison en 1981, *Brain Gym* est une méthode issue de la kinésiologie qui indique que pour fonctionner correctement, et donc pour mieux apprendre, les zones du cerveau doivent être parfaitement coordonnées. Le concept du *Brain Gym* propose donc aux enseignants de stimuler et éveiller le cerveau de leurs élèves grâce à une gymnastique spécifique (selon les quatre étapes ECAP : énergie, clair, actif, positif) et une bonne hydratation. Le cerveau qui se met alors « sous tension » (à la manière d'un interrupteur) est prêt à recevoir l'information et la mémoriser efficacement [1]. Très commercialisée aux États-Unis, cette méthode rencontre un grand succès auprès du grand public et des éducateurs bien qu'aucune recherche à ce jour ne l'ait validée et qu'elle affiche de nombreux détracteurs dans les cercles neuroscientifiques (Pasquinelli, 2012).

[1] Il suffit d'ailleurs de constater l'enthousiasme démontré par ces élèves d'un collège vénézuélien lors d'une démonstration de *Brain Gym* pour être persuadé de son efficacité !

LES AMBITIONS DES NEUROSCIENCES SUR LE PLAN ÉDUCATIF

Dans l'idée d'appliquer les résultats trouvés en neurosciences au monde de l'éducation, certains neuroscientifiques ont voulu soit faire des expériences directement en classe, soit appliquer à l'école les résultats trouvés en laboratoire. Nous aborderons ici les difficultés conceptuelles rencontrées et les problématiques soulevées. Les obstacles sont d'ordre pratique (limitations méthodologiques) ou scientifique (rencontre obligée avec les recherches en éducation).

Exemple d'application en classe
Une des expériences appliquant des résultats de neurosciences en classe consiste à voir si la formation des enseignants aux « *principes scientifiques de la lecture* » (tirés des recherches neuroscientifiques) peut améliorer les résultats des élèves de CP en lecture (Dehaene, 2011). Les premiers résultats de cette expérimentation engagée en 2010-2011 auprès de 1 800 élèves paraissent décevants pour l'auteur, au point que le passage du laboratoire à la salle de classe lui semble très difficile. Malgré cette remarque, il conclut son ouvrage par : « *Notre conclusion sera donc très simple : la science de la lecture est solide ; les principes pédagogiques qui en découlent sont aujourd'hui bien connus ; seule leur mise en application dans les classes demande encore un effort important* ». Ne questionnant pas la méthodologie employée (groupes témoin et contrôle, tirage au sort des enseignants formés, choix des tests de performance en lecture, type de formation reçue...) ou les hypothèses de recherche (prise en compte du rôle de l'écrit), il met la balle dans le camp de l'Éducation nationale, invitant à une meilleure formation des enseignants, à un accès à des ressources « *structurées et motivantes* » ou à des outils pédagogiques compatibles avec cette « *science de la lecture* ». La dernière phrase de l'ouvrage « *des sciences cognitives à la salle de classe* [sous-titre de l'ouvrage], *il ne reste qu'un petit pas à franchir* » montre l'écart qui sépare les chercheurs en neurosciences de la réalité de la classe (voir le point de vue de Roland Goigoux dans le Bulletin de la Recherche de l'IFÉ n° 19 de 2013).

Un mariage incertain

Des variables, des élèves... et la réalité de la classe

Beaucoup de chercheurs en neurosciences cognitives considèrent que toute recherche qui s'intéresse à l'éducation doit obéir aux mêmes règles que les recherches en laboratoire. Pour Dehaene (2011) en effet, « *seule la comparaison rigoureuse de deux groupes d'enfants dont l'enseignement ne diffère que sur un seul point permet de certifier que ce facteur a un impact sur l'apprentissage* », comme en recherche médicale : « *chaque réforme […] devrait faire l'objet de discussions et d'expérimentations aussi rigoureuses que s'il s'agissait d'un nouveau médicament* ». Les chercheurs en éducation paraissent souvent sceptiques vis-à-vis des expérimentations faites en neurosciences, qu'ils trouvent justement trop contrôlées au regard du nombre très important de variables à étudier en classe (Ansari *et al.*, 2012). Les mêmes auteurs ajoutent que les neuroscientifiques devraient considérer le vécu et l'environnement d'apprentissage comme des variables à prendre en compte et à développer plutôt qu'à contrôler absolument ❶ (De Smedt *et al.*, 2010).

Pour Ansari *et al.* (2012, voir aussi Stern, 2005), la méthodologie à privilégier en éducation est celle de l'administration de la preuve (*evidence-based*), qui apporte une nouvelle donne politique : « *Thus, neuroscience is one of the fields of inquiry that funding agencies and policy makers have turned to for answers to large-scale educational problems.* » Adoptant cette méthode et l'appliquant au domaine de la lecture, Battro (2010) affirme que la méthode globale est inefficace ❷ et généralise ce résultat : « *brain research can invalidate specific methods of teaching* », mais en restant malgré tout prudent dans sa conclusion ❸.

Le point de vue de l'Inspection générale sur deux expérimentations en lecture

❶ On peut noter ici la difficulté à définir ce que pourraient être des variables caractérisant le vécu d'apprentissage de l'élève ou son environnement social et physique (voir le tableau comparatif des objectifs et méthodologies des neurosciences cognitives et des recherches en éducation d'Ansari & Coch, 2006).

❷ Nous renvoyons de nouveau à un dossier précédent (Feyfant & Gaussel, 2007) qui aborde le débat de 2006 sur les méthodes de lecture les plus efficaces, dont il semblerait qu'il se soit clos sur les avantages d'une méthode mixte d'apprentissage, ce qui paraît confirmé par le rapport du CERI (2007) : « *On peut donc supposer que : idéalement, l'enseignement de la lecture combine sans doute l'approche syllabique et la méthode globale* ».

❸ « *It must be clear, however, that the neuroeducator is not prescribing a particular method or theory but only modestly advising the colleagues to be cautious in the practice of teaching because some methods may risk contradicting neuroscientific evidence and fail* » (Battro, 2010).

Limitations de la neuro-imagerie

Pour mieux comprendre pourquoi les méthodes de recherche en neurosciences cognitives ne franchissent apparemment pas la porte du laboratoire, penchons-nous sur la méthodologie la plus employée, la neuro-imagerie.

Sur le plan théorique, la méthode soustractive utilisée en neuro-imagerie (comparaison d'activation du cerveau entre deux tâches à effectuer) est selon Tiberghien (2007) un « *pari à très haut risque et qui peut même être théoriquement et logiquement contesté* ». À propos de cette hypothèse de base de la neuro-imagerie qui postule un lien étroit entre les structures cérébrales et les processus psychologiques, Adolphs (2010) affirme que **la connaissance anatomique du cerveau ne suffit pas à expliquer les processus mentaux**. Il précise que les scientifiques commencent à découvrir que ce sont de petites régions de neurones (des « sous-aires » fonctionnelles) constituées en **réseaux** qui s'activent, et non une aire particulière : notre connaissance des neurones réellement activés est donc encore lacunaire. Or les techniques d'imagerie sont précises dans l'espace ou dans le temps, mais pas encore dans les deux, alors que les connexions en réseau se font très rapidement et dans des zones très fines [1]. Dans l'exemple de l'acquisition du langage (Sakai, 2005 ; Kail, 2012), les dernières études de neuro-imagerie se placent d'ailleurs dans un modèle hybride, puisqu'elles cherchent à comprendre « *la façon dont le cerveau travaille* » (Houdé, 2008), en prenant en compte à la fois réseaux et aires spécifiques. Sur l'exemple de l'étude de l'empathie, Ehrenberg (2008) remarque que la conclusion des articles étudiés « *est toujours au conditionnel, elle reste hypothétique* ». Pour lui, ces expériences reliant aires cérébrales et caractéristiques de l'empathie mettent en évidence des corrélations et non des mécanismes (impliquant une relation causale), ce qui n'est pas interrogé par la plupart des auteurs. Certains dénoncent même une nouvelle « technophrénologie [2] » et une **manipulation des esprits** par de nombreux chercheurs ou décideurs (Tiberghien, 2007).

Sur le plan pratique, la méthodologie utilisée en neuro-imagerie fait l'objet de nombreux débats. Comme on l'a vu, ces techniques sont des méthodes d'investigation indirectes et sont très fastidieuses à mettre en place et à utiliser, aussi bien pour le sujet que pour le chercheur. Les critiques essentielles portent sur les échantillons utilisés par les chercheurs, trop faibles ou ne portant que sur des adultes, panels mal constitués car choisis souvent au hasard, sans critères prédéfinis (Ansari *et al.*, 2012 ; Claeys & Vialatte, 2012 ; De Smedt *et al.*, 2010) ; les tests eux-mêmes, forcément simples à cause des contraintes techniques, pouvant être ambigus et souvent peu interrogés (De Smedt *et al.*, 2010) ; les calculs fondés sur un moyennage important et sur un seul modèle type de cerveau [3] ; le manque d'études longitudinales et la non-confirmation des résultats d'expériences précédentes dans un souci de généralisation [4] (Claeys & Vialatte, 2012). D'après certains neuroscientifiques eux-mêmes, la rigueur scientifique en neuro-imagerie n'est apparemment pas toujours au rendez-vous, entraînant des résultats anormalement optimistes (Poldrack, 2012 ; voir également Vul *et al.*, 2009) et des conclusions fragiles, qui sont repris dans d'autres études : il y a danger de régression (Turner, 2011).

[1] « *La neuro-imagerie ne permettra sans doute jamais d'apporter des connaissances théoriques nouvelles dans le domaine d'étude de la cognition. Mais elle permettra sans doute, plus modestement mais très efficacement, de mettre en évidence les réseaux neuronaux qui participent à certaines opérations cognitives et, par conséquent, de valider les modèles qui les ont inventées à partir d'approches multiples. Que serait la neuro-imagerie cognitive sans la psychologie du comportement et sans la psychologie cognitive ?* » (Plas, 2011)

[2] « *Par quel miracle des entités cognitives, mal ou peu définies, pourraient-elles être localisées précisément dans le cerveau ? Que penser de ces recherches, publiées dans des revues apparemment sérieuses, qui trouvent dans le cerveau aussi bien les neurones de la sagesse que les neurones de la sympathie. [...] ces recherches utilisent simplement le prestige technologique de la neuro-imagerie afin de justifier des idées reçues du sens commun ou des conceptions psychologiques, sociales, et même politiques, largement dominantes.* » (Tiberghien, 2007

[3] Les images présentées sont trompeuses et ne reflètent pas l'activité d'un cerveau spécifique : « *The kinds of experiments that would be of interest to an educationist are exactly those that are most difficult for neuroscientists to perform, because of the methodological assumptions built into neuroscience techniques.* » (Turner, 2011, voir également Ansari *et al.*, 2012 ; Agid & Benmakhlouf, 2011)

[4] Oullier (dans Claeys & Vialatte, 2012) s'étonne : « *Bien qu'elles soient centrales, ces questions [de variabilité des expériences] n'ont pas été traitées au même niveau dans la littérature (neuro)scientifique que les éventuels liens entre activité cérébrale et comportement, par exemple. Cela n'est pas sans conséquence dans l'appréhension sociétale des applications, effectives ou fantasmées, de l'utilisation au quotidien de l'imagerie cérébrale.* »

La neuro-éducation : la grande illusion ?

Malgré toutes ces limitations et contraintes, à la fin des années 2000, certains chercheurs ont défendu l'idée d'une nouvelle discipline, la **neuro-éducation**. Pour Meltzoff *et al.* (2009), son origine est la rencontre de la psychologie, de l'apprentissage artificiel, des neurosciences et des sciences de l'éducation. Le CERI (en 1999 avec le projet « Brain and Learning », voir également CERI, 2002, 2007) parle d'une nouvelle « science de l'apprentissage » qui ouvre des pistes de recherche et de politique éducative et qui doit être transdisciplinaire. Certains chercheurs en éducation ont vite su entrevoir les opportunités qu'offrent les neurosciences, que ça soit dans les universités avec la création de nouveaux masters ou pour leur champ de recherche, avec par exemple le lancement de la revue *Mind, Brain, and Education* en 2007, ou encore la naissance du terme « *brain-based learning* ». Les médias ou les revues scientifiques ont rivalisé à cette époque dans l'escalade de formules associant le cerveau et l'école.

Beaucoup d'enthousiasme...

- « The learning brain: Lessons for education » traduit par « Un cerveau pour apprendre : Comment rendre le processus enseignement-apprentissage plus efficace » (Sousa, 2002)
- « Des sciences cognitives à la salle de classe » (Dehaene, 2011)
- « The brain in the classroom? » (Goswami, 2005)
- « Du cerveau à la pointe du crayon » (Universcience.tv, 2009)
- « Les neurones de la lecture » (Dehaene, 2007)
- « Pedagogy meets neuroscience » (Stern, 2005)
- « Mind, Brain, and Education: Building a scientific groundwork for learning and teaching » (Fischer, 2009)

L'objectif de la neuro-éducation est de mieux structurer les environnements d'apprentissage à partir des résultats obtenus sur le cerveau. L'apport des recherches en éducation est censé permettre à la neuro-éducation d'éviter les applications trop directes du laboratoire à la salle de classe. En plus des limitations vues précédemment, le manque de consensus et le passage permanent d'une théorie vers une autre ainsi que l'enthousiasme des politiques envers les neurosciences ont participé à la confusion qui règne autour des principes de neuro-éducation (Howard-Jones, 2008).

D'autres chercheurs (ou les mêmes quelques années plus tard) sont plus réservés, voire sceptiques vis-à-vis de cette nouvelle discipline et critiquent notamment le manque d'entente et de communication entre les disciplines de recherche (voir Davis, 2004) ; la prévalence des preuves biologiques sur les autres ; les limitations théoriques et méthodologiques de la neuro-imagerie qui ne peut se faire aujourd'hui dans le contexte de la classe [1] ; les attentes très fortes des enseignants (Ansari *et al.*, 2012).

...nuancé par quelques doutes

- « Education and the brain: A bridge too far » (Bruer, 1997)
- « Bridges over troubled waters: Education and cognitive neuroscience » (Ansari & Coch, 2006)
- « Can this marriage be saved? The future of "Neuro-education" » (Schrag, 2013)
- « Cognitive neuroscience meets mathematics education : It takes two to Tango » (De Smedt *et al.*, 2011)
- « Does neuroscience matter for education? » (Schrag, 2011)
- « Scepticism is not enough » (Howard-Jones, 2009)
- « The use and misuse of neuroscience in education » (Della Sala, 2009)

[1] *« Si l'expression [de neuropédagogie] est, sans contexte, intellectuellement stimulante et constitue même un pari, les travaux des neurosciences se trouvent à l'aube de découvertes certes prometteuses mais encore trop peu avancées pour véritablement permettre de penser que les actes pédagogiques pourraient directement s'appuyer sur les données neuroanatomiques. À notre sens, une certaine prudence s'impose. »* (Écalle & Magnan, 2005)

À propos de l'interdisciplinarité de la neuro-éducation, Turner (2011) dénonce la prédominance des points de vue neuroscientifiques dans de nombreux articles (comme celui de De Smedt *et al.*, 2010, auquel il répond), sans regard critique sur leurs méthodes et avec un parti pris posant les recherches en éducation comme complément ou faire-valoir des neurosciences. Puisque les résultats des recherches en laboratoire sont déconnectés des politiques éducatives et entraînent un intérêt limité pour la pratique, l'effet des neurosciences sur l'éducation pourrait bien n'être qu'indirect (Hinton & Fischer, 2010 ; Ansari *et al.*, 2012). Eisenhart et DeHaan (2005) « *précisent que les recherches en éducation ne peuvent se faire sans considération de leur application dans le domaine éducatif, quelle que soit leur qualité intrinsèque* ». Ansari et Coch (2006) invitent de leur côté à discuter des mécanismes possibles qui permettront de connecter les laboratoires de neurosciences aux salles de classes, plutôt que de s'épuiser à rechercher les applications directes.

Goswami (2006) précise, après avoir observé des conférences entre chercheurs britanniques en neurosciences et enseignants, que les neuroscientifiques ne sont pas les mieux placés pour communiquer avec les enseignants, qu'il faudrait des personnes dédiées pour faire le lien (voir dans la même idée le concept de neuro-éducateurs chez Stein *et al.*, 2011). Schrag (2013) ajoute que les neurosciences aident à comprendre les processus d'apprentissage mais ne changeront pas fondamentalement la pédagogie en salle de classe, puisqu'**aucun outil**, constate-t-il, **aucune méthode proposés pour remédier aux difficultés d'apprentissage ne proviennent des recherches en neurosciences**, mais sont plutôt **issus de la psychologie cognitive**.

La guerre des sciences
La bataille portant sur la nature et le contrôle des variables utilisées lors des expérimentations a fini par donner lieu à une véritable guerre ayant comme objets la preuve scientifique et la légitimité scientifique des différents types de recherches (sciences naturelles versus sciences humaines) dans le domaine de l'éducation. D'après Ansari *et al.* (2012), la plupart des neuroscientifiques sont soit ignorants des recherches actuelles en éducation, soit les sous-estiment. Une phrase comme « *Je dis aux éducateurs : ne prenez pas les enfants pour des têtes vides que vous allez remplir* » (Dehaene, 2012) montre que l'image que l'auteur a du métier d'enseignant ne semble pas tenir compte de la formation des enseignants et des recherches en éducation depuis les années 1970, voire depuis le modèle du « *vase vide* » dénoncé par Rousseau. Lire la suite...

LE CERVEAU : BIOLOGIQUE OU SOCIAL ?

Les applications des neurosciences cognitives en classe relèvent donc du domaine de l'utopie pour l'instant, puisque la méthodologie employée n'est pas adaptée à une étude sur le terrain de la classe et que les résultats sont mal interprétés.

Les tensions entre spécialistes des différents domaines proviennent de points de vue divergents sur le fonctionnement du cerveau dans le cadre de l'apprentissage. Il est avant tout biologique pour les uns, mais prend en compte l'environnement ; il est profondément social pour les autres, tout en étant l'essence même de l'individu. Partant du concept de développement pour arriver aux concepts de plasticité et de construction, le modèle du cerveau est devenu dynamique (Andrieu, 2001) : sous l'effet de l'action et de l'environnement, le cerveau s'auto-organise spontanément.

L'apprentissage serait donc la capacité à transformer son cerveau grâce à son environnement. L'unicité de chaque cerveau est là aussi source d'interrogation : « *Une question fondamentale est celle de l'origine de la variabilité individuelle dans le fonctionnement du cerveau. Est-elle innée ou acquise ? Avec le développement de nos connaissances en neurobiologie, des progrès considérables ont été réalisés dans la compréhension du rôle des gènes et des facteurs de l'environnement dans l'activité cérébrale* » (Vidal, 2011).

L'opposition inné/acquis dépassée

Dans l'exemple de l'acquisition du langage et malgré les formidables progrès réalisés ces dernières années, « *sans doute, le vieux débat inné/acquis persiste-t-il en raison même de l'absence d'une théorie testable concernant les processus par lesquels les gènes et l'environnement interagissent pour produire des structures cognitives complexes* » (Kail, 2012). C'est le cas des différentes théories d'apprentissage de la grammaire ❶, tentant de se situer entre celle de Chomsky (grammaire universelle, à partir de modules innés ❷ encapsulés avec « *une architecture neuronale fixe* ») et celle de Piaget (constructivisme pur).

D'après Karmiloff-Smith et Thomas (2005), la théorie innéiste et l'empirisme sont à dépasser pour mieux comprendre le développement du cerveau du nourrisson, et notamment pour les fonctions cognitives supérieures. La théorie innéiste prend bien en compte l'environnement, mais comme « *simple déclencheur d'une base génétique préformée au développement* », cette base étant souvent décrite comme un ensemble de **modules** cognitifs spécifiques et indépendants ; l'empirisme pense l'environnement « *comme le pourvoyeur principal de connaissances cognitives* ». Ces auteurs proposent alors une nouvelle voie de spécialisation des circuits cérébraux des nourrissons : au contact prolongé de l'environnement vers lequel ils sont attirés par leurs perceptions, des réseaux d'interactions entre aires cérébrales s'établissent et se construisent petit à petit pour former les modules structurés et spécifiques que l'on connaît dans les cerveaux adultes. Cela amènerait à « *un processus très progressif de modularisation tout au long du développement* », que ces auteurs appellent le **neuro-constructivisme**.

Cette théorie jette un tout autre regard sur les troubles génétiques (comme le syndrome de Williams) et remet en cause une des hypothèses de base de la psychologie évolutionniste, à savoir la « *co-existence cloisonnée entre, d'un côté, des domaines cognitifs déficients et circonscrits et, de l'autre, des domaines cognitifs épargnés* » (Karmiloff-Smith & Thomas, 2005). Il semblerait donc que les modules correspondant à une déficience soient plutôt distribués dans le fonctionnement global du cerveau (par suite d'un développement atypique) que localisées dans une zone précise.

L'esprit, un concept biologique ou philosophique ?

Les neurosciences cognitives étudient le cerveau et l'esprit comme deux entités intimement liées car la notion d'esprit ❸ sert aux neuroscientifiques à explorer la relation entre notre cerveau, nos comportements, nos façons d'apprendre. En voulant expliquer les processus mentaux par des causes biologiques, les neurosciences cognitives ont pour ambition de « *traiter les états mentaux comme des objets naturels, c'est-à-dire réductibles à des relations de causalité* » (Tiberghien, 2002) : c'est ce que les philosophes nomment la naturalisation de l'esprit. Dans cette idée, plus de dualisme possible entre « les choses mentales » et « les choses matérielles », mais un matérialisme se proposant d'expliquer physiologiquement les concepts les plus psychologiques comme l'intention, la conscience, les émotions, etc. ❹ S'est ainsi déve-

❹ Andrieu (2001) dénonce les « neuroscientistes », neuroscientifiques qui ont naturalisé les concepts philosophiques tels que la nature humaine, l'inné et l'acquis, l'intelligence, le langage, les émotions... Pour lui, le cerveau ne doit plus être étudié seulement par les neuroscientifiques, mais par des praticiens et des théoriciens de plusieurs disciplines où l'épistémologie tient une place importante.

❶ On trouve les théories du *bootstrapping* (pour laquelle les structures linguistiques se découvrent à partir d'une connaissance innée et non de l'environnement) et les approches fonctionnalistes, comme les principes opérationnels de Slobin, le modèle de compétition, connexionniste, ou la théorie constructiviste de Tomasello (voir Kail, 2012).

❷ La théorie de la **modularité de l'esprit**, datant du début des années 1980 et promue par le philosophe Jerry Fodor (1986), sépare l'esprit humain en modules spécialisés dans certaines fonctions cognitives. Ces modules fonctionnent inconsciemment, automatiquement, indépendamment les uns des autres et de manière innée. Cette théorie a soulevé de nombreux débats en sciences cognitives.

❸ Selon Paul Ricœur (voir son dialogue avec Jean-Pierre Changeux, 1998), le mot « esprit » désigne le sens général de mental, le niveau transcendantal (visée du Vrai, du Bien, du Juste, du Beau) et un niveau d'inspiration.

loppée une **philosophie de l'esprit**, ou philosophie cognitive, qui est chargée de mettre au jour « *les substrats neuronaux de nos activités mentales, de nos conduites morales et sociales ainsi que de nos affects* », et qui s'oppose par là au courant plus classique de la philosophie (qui pour Catherine Malabou dans son article de blog « Pour une critique de la raison neurobiologique » n'a pas pris la mesure des conséquences des découvertes neuroscientifiques sur les concepts philosophiques ❶).

❶ Elle précise en effet dans cet article que « *nier la continuité du biologique au culturel – si l'on fait de la plasticité un fil directeur – est impossible et philosophiquement intenable. Après tout, les présupposés qui pourraient fonder une neurophilosophie ne sont pas contestables en eux-mêmes.* » Elle prône ainsi une « *réélaboration du concept de liberté* », dans une interrogation plus large sur « *une réflexion du cerveau sur lui-même* ».

Les femmes ont des capacités multitâches, les hommes sont meilleurs en mathématiques ?

Le volume, la forme et le mode de fonctionnement de chaque cerveau étant unique, il n'est pas possible de dégager des traits propres à chaque sexe. On sait aujourd'hui que la sexualisation du cerveau s'effectue au stade embryonnaire mais uniquement de façon physiologique pour les fonctions de reproduction (comme le déclenchement de l'ovulation), mais pas de façon cognitive. **Il n'y aurait pas, et ce malgré des idées déterministes fortement ancrées, de différences entre les cerveaux masculin et féminin en termes de capacité ou de comportement intellectuel.** « *L'humain est d'abord le produit d'une histoire culturelle et sociale* » (Vidal, 2011). Selon elle, aucune étude n'a montré de processus différents selon les sexes dans la constitution des réseaux neuronaux lors de l'apprentissage et un enseignement différencié n'aurait donc aucune justification neurologique. Ce mythe du cerveau multitâches féminin par exemple tient son origine d'une expérience datant de 1982 qui portait sur 20 cerveaux conservés dans du formol. Depuis, et malgré de nombreuses recherches dénonçant ces résultats, ce mythe colporté par les médias principalement car attractif et vendeur, perdure au détriment de l'évolution des conceptions scientifiques ❷. Vidal (2011) ajoute : « *Au-delà des effets d'annonce, l'argument de la biologie fait toujours autorité pour expliquer les différences entre hommes et femmes. Et par là-même, il permet d'évacuer par des preuves scientifiques objectives les raisons sociales et culturelles des inégalités entre les sexes* ». On peut lui opposer d'autres opinions exposées dans de nombreux articles qui présupposent des différences entre les cerveaux des hommes et des femmes (Gong *et al.*, 2011 ; Andreano & Cahill, 2009 ; Leonard *et al.*, 2008). Il est à noter cependant que ces chercheurs travaillent à partir des cerveaux d'individus adultes dont les circuits neuronaux auraient déjà été influencés par leur environnement culturel et social.

❷ Les propos de Summers, président de l'université d'Harvard, sur l'incapacité innée des femmes à réussir dans les matières scientifiques l'ont poussé à démissionner en 2006. Ces propos ont d'ailleurs été aussitôt démentis dans un rapport des académies de médecine, des sciences et des technologies de 2007 qui stipule : « *Biological explanations for the dearth of women professors in science and engineering have not been confirmed by the preponderance of research. Studies of brain structure and function, of hormonal modulation of performance, of human cognitive development, and of human evolution provide no significant evidence for biological differences between men and women in performing science and mathematics that can account for the lower representation of women in these fields.* »

Ces questions des relations entre cerveau et esprit ont fait naître de nombreux débats dans d'autres domaines que la philosophie, notamment en sociologie. Alain Ehrenberg (2008) indique que l'imagerie cérébrale (tout comme la biologie moléculaire ou la génétique) postule une « *biologie de l'esprit, c'est-à-dire une biologie de l'homme agissant et pensant qui se démontre expérimentalement en laboratoire* ». Il critique le naturalisme réductionniste qui oppose les faits, objectivables, quantifiables dans une démarche scientifique aux valeurs, subjectives, qui dépendent donc de l'opinion : « *Or, la caractéristique du fait social est précisément que l'opinion n'est pas extérieure à l'objet, mais en est bien au contraire une propriété.* » **On ne peut pas comprendre un individu si on ne prend pas en compte sa personne**, c'est-à-dire sa relation directe avec autrui mais aussi sa place et son rôle dans la société. Ehrenberg dénonce également le fait que les neuroscienti-

fiques considèrent les individus comme des organismes séparés dont on peut étudier les interactions, en ajoutant des paramètres supplémentaires. Il propose alors de dépasser les concurrences ou la recherche d'interdisciplinarité entre sociologie et neurosciences, qui sont avant tout pour lui « *deux types de travail différents* ».

De son côté, Lahire (2013) propose de ne pas tomber dans le corporatisme ni l'abdication face aux découvertes sur le « **cerveau social** », mais ouvre une nouvelle voie qui, tout en restant dans le champ sociologique et ses exigences épistémologiques, emprunte aux neurosciences, à la psychologie cognitive et à d'autres disciplines les éléments qui pourraient l'éclairer. Il définit le **dispositionnalisme** comme une reconstruction par les individus de leurs expériences de socialisation passées en vue d'agir dans un contexte donné (« *la disposition repose sur un mécanisme d'*anticipation pratique *du cours des événements* »). Il postule que « *les connexions neuronales fonctionnent donc comme des* ***programmes d'action*** *(au sens large du terme) incorporés* ***en attente de sollicitations sociales****.* »

Le social vu par les neurosciences cognitives

LES NEUROSCIENCES COGNITIVES, UN OUTIL SOLLICITÉ MALGRÉ TOUT

Deux champs se sont développés malgré tout à l'école : l'**étude du phénomène des troubles de l'apprentissage** et les **études portant sur les environnements d'apprentissage**. Provenant du domaine médical ou des résultats sur la prise en compte de la plasticité du (jeune) cerveau, ces champs d'application et de recherche n'utilisent les neurosciences que comme un outil parmi d'autres pour aborder les problématiques complexes du quotidien des élèves dans la classe. Des explorations se font également dans des champs réservés jusque-là aux recherches en éducation (comme la didactique), non sans déclencher quelques controverses.

TROUBLES (MÉDICAUX) OU DIFFICULTÉS (SCOLAIRES) ?

En 2000, le rapport Ringard « À propos de l'enfant dysphasique et de l'enfant dyslexique » pose les pierres d'une entrée médicale pour certaines difficultés d'apprentissage, traitées jusqu'à présent en France par une approche pédagogique et dont l'origine était située plutôt dans les domaines affectif, psychologique ou social que neurobiologique (notamment pour l'acquisition du langage). Historiquement, les neurosciences cognitives ont débuté par des études sur les lésions cérébrales et les développements atypiques pour mieux appréhender les phénomènes mentaux (voir les patients aphasiques de Broca), ce qui a renforcé leur lien très étroit avec la médecine.

Nous allons aborder les résultats obtenus dans l'étude des principaux **troubles « dys »** que sont la dysphasie, la dyslexie, la dyscalculie et la dyspraxie. Ces résultats sont nuancés d'emblée par un rapport de l'INSERM (2007) : « *Malgré les progrès des dernières années, en particulier pour la dyslexie, la plupart des définitions des troubles des apprentissages ne sont pas très opérationnelles et les critères diagnostiques ne sont pas bien définis* » (on peut consulter à ce propos la Classification statistique internationale des maladies et des problèmes de santé connexes adoptée par l'OMS ou, plus spécifiquement, le Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux publié par l'American Psychiatric Association, qui soulève de nombreuses controverses).

Dysphasies et autres troubles spécifiques du langage

La notion de trouble de l'évolution du langage est devenue centrale dans les politiques éducatives ❶ puisqu'elle a un impact sur d'autres troubles, notamment la dyslexie ❷, mais la question de savoir si une dysphasie entraîne forcément une dyslexie n'est actuellement pas encore tranchée. Concernant l'acquisition atypique du langage, il y a deux possibilités : soit les dysfonctionnements concernent le développement de l'enfant en général

❶ Les étapes de l'**intervention des professionnels** de santé (médecins, orthophonistes) et du champ éducatif (enseignants spécialisés ou non) sont la prévention en maternelle (vers 4 ans), le diagnostic (effectué par les médecins en général, sous la forme de batteries de tests choisis parmi les très nombreux existants) et la prise en charge des élèves dysphasiques, en classe ordinaire ou spécialisée.

❷ « *Il existe en effet un consensus sur le fait que les enfants présentant un trouble précoce du langage oral ont un risque plus élevé, par rapport aux enfants dont l'évolution langagière a été normale, de rencontrer des difficultés dans les acquisitions scolaires, en particulier dans l'apprentissage du langage écrit* » (voir le rapport « L'évolution du langage chez l'enfant : de la difficulté au trouble » de l'INPES rédigé par Delahaie, 2004 ; Ziegler & Goswami, 2005).

et donc affectent entre autres l'acquisition du langage, soit ils sont spécifiques au langage. Les études portant sur ces troubles distinguent également retard de développement (qui se résout de lui-même en général ou fait suite à une pathologie identifiée par ailleurs) et développement atypique.

Si un enfant ne présente pas de lésions des aires cérébrales qui concernent le langage ❶ ou ne présente pas une autre pathologie (surdité, autisme, etc.) et que le développement de son langage est pourtant retardé et ralenti, il peut présenter un trouble spécifique de l'évolution du langage oral appelé **dysphasie**. Elle est souvent associée à des troubles de la motricité fine, de la mémoire verbale à court terme, et éventuellement du comportement. La dysphasie est donc assez difficile à diagnostiquer et à isoler.

Il existe plusieurs types de dysphasie selon qu'elle touche l'expression orale (difficultés à produire les mots, mais compréhension normale), la formulation du langage (phrases structurées et adaptées, mais langage inadapté au contexte et manque de compréhension) ou les deux (forme la plus fréquente, appelée aussi déficit phonologico-syntaxique ❷). On ne sait pas encore si le développement du langage des enfants dysphasiques est différent de celui des autres enfants, mais il semblerait que oui (Kail, 2012 ; Delahaie, 2004). L'origine génétique de ce trouble semble être la piste la plus probable actuellement, ainsi que des anomalies cérébrales au niveau de l'asymétrie des deux hémisphères.

Certains chercheurs en linguistique ou des psychologues soulignent l'importance d'une prise en charge spécifique et globale de l'enfant dans ce trouble très handicapant pour son développement ❸. D'autres, sur l'exemple de l'agrammatisme ou de la faiblesse du stock lexical (deux critères de diagnostic de ce trouble), discutent la « *légitimité du concept de dysphasie* », appelant à prendre en compte le système dynamique complexe (« *concept précis et dont les propriétés sont connues : sensibilité aux conditions initiales, historicité, stabilité, émergence* ») des troubles du langage, notamment dans les registres sémiotique, cognitif, neurophysiologique et psychique (Virole, 2010).

Dyslexie

La **dyslexie** est définie comme un « *trouble persistant de l'identification des mots écrits* » (Tardif & Doudin, 2011 ; voir également Shaywitz *et al.*, 2008). Elle serait caractérisée par un trouble phonologique ou des difficultés de traitement visuo-attentionnel et déboucherait sur des troubles du langage oral ou dans certains cas sur une dysorthographie. Ce sont certains sites neuronaux parmi ceux impliqués dans l'apprentissage de la lecture qui semblent sous-activés dans ce trouble (notamment les zones situées dans les lobes temporal et pariétal gauches, dont la fameuse aire de la forme visuelle des mots), entraînant des difficultés d'ordre phonologique et orthographique. Mais l'organisation fonctionnelle de ces sites semble jusqu'à présent ne pas être différente chez les dyslexiques (Goswami, 2008b). D'autres zones cérébrales semblent au contraire montrer une activité plus importante, comme dans le lobe frontal (voir le rapport final du projet européen Neurodys, en 2011).

La neuro-imagerie est utilisée ❹ pour repérer les sites sous-activés (par l'IRMf) ou pour mesurer les différences de temps d'activation chez les dyslexiques (entre le moment où le sujet voit une lettre et la prononce, à l'aide de l'EEG ou de la MEG), ou encore pour mesurer les effets d'une remédiation (pour savoir s'ils sont spécifiques à la dyslexie ou dus à l'émotion ou la motivation, ce qui peut être appréhendé par combinaison de la MEG et de l'IRMf ou par la TEP). D'autres études portent sur les enfants à risque (c'est-à-dire appartenant à une famille comportant des dyslexiques) et leurs capacités de discrimination des sons et des mots, mesurées par EEG. Goswami (2008b) nuance malgré tout l'apport de

❶ Si un déficit de parole provient une région cérébrale lésée (intervenant directement ou indirectement pour le langage), on parle d'**aphasie** si la région lésée traite de la phonologie, du lexique et de la morphosyntaxe et d'**agnosie** ou d'**apraxie** si les aires affectées concernent la perception des sons ou l'organisation des gestes articulatoires parlés.

❷ Pour plus de détails sur l'étude de la compréhension des sons, on peut consulter le guide pratique de la Direction générale de la santé et de la Société française de pédiatrie « Les troubles de l'évolution du langage chez l'enfant » (ou le site « Approche neurosensorielle du langage oral » de l'université de Montpellier 2).

❸ « *Les troubles du langage ont des répercussions importantes sur l'ensemble de la personnalité d'un enfant : un enfant qui parle mal ne peut pas faire confiance à sa parole pour étayer sa pensée et ses échanges avec autrui [...] L'une des difficultés importantes du travail thérapeutique consiste à faire que cette confiance renaisse* » (Danon-Boileau, 2010).

❹ Les tâches données aux sujets adultes ou enfants dyslexiques consistent à reconnaître des lettres différentes, des rimes de « vrais » et de « faux » mots, des homonymes, à classer des mots selon leur catégorie sémantique, etc.

la neuro-imagerie à l'étude de l'origine de la dyslexie [1].

Il n'y a pas, à ce jour, de théorie avérée, mais seulement des pistes d'ordre génétique (migration neuronale défaillante pendant la période fœtale ou déficit de matière grise), phonologique, visuel, moteur, susceptibles d'expliquer les causes de la dyslexie. Concernant un possible déficit de la perception des sons de la parole, des études montrent que la plupart des dyslexiques ont des difficultés au niveau de la conscience phonologique, de la mémoire à court terme et de l'analyse phonémique (voir également Ziegler & Goswami, 2005). L'hypothèse d'un trouble de l'attention visuelle, valable *a priori* pour la dyslexie de surface, se traduirait par l'impossibilité de mettre plus de deux ou trois lettres en mémoire et donc d'identifier directement les mots (Delahaie, 2004).

Débat autour de la dyslexie et du concept de « norme biologique de la lecture »
Il peut être intéressant ici d'adopter un point de vue sociologique de ce trouble très cadré par les politiques éducatives actuelles et pris en charge par les professionnels de santé. Woollven (2011) précise ainsi, dans la *Revue internationale de politique comparée*, que « *le repérage et la prise en charge de la dyslexie se situent donc au croisement de la pédagogie et de la pathologie, prenant différentes formes selon les contextes : une approche diagnostique et rééducative en France, une approche évaluative et remédiative au Royaume-Uni* ». Elle évoque une « *norme biologique de la lecture* »...
Lire la suite...

La dyslexie entraîne souvent des difficultés dans d'autres domaines, comme le langage oral, l'arithmétique, le repérage temporel (débouchant pour sa forme sévère sur la dyschronie), l'attention avec ou sans hyperactivité, le développement moteur (troubles de la dyspraxie et de la dysgraphie). Certains troubles comportementaux ou émotionnels peuvent aussi être associés à la dyslexie (INSERM, 2007).

En ce qui concerne les troubles spécifiques de l'écriture, la **dysorthographie** est souvent mieux définie que la dysgraphie (trouble de la calligraphie), puisqu'elle est étroitement associée au trouble phonologique des dyslexiques (INSERM, 2007). Les études de neurosciences ne séparent pas en général la dysorthographie de la dyslexie (INSERM, 2007) : on parle alors de comorbidité avec les troubles du langage écrit, voire avec la dyscalculie dans certains cas.

Dyscalculie

La dyscalculie développementale [2] est définie par les autorités éducatives comme un trouble du fonctionnement cognitif relatif aux nombres, c'est-à-dire à la difficulté de comprendre de simples concepts mathématiques et à l'absence de compréhension intuitive (voir la partie sur la perception des nombres). Ce trouble semble avoir des causes génétiques qui peuvent être diagnostiquées grâce à des tests portant sur de simples opérations de comparaison ou de classement de nombres [3]. Comme la dyslexie, la dyscalculie n'est pas la conséquence d'autres troubles cognitifs et peut se révéler chez des individus ayant un QI élevé et qui ont un comportement normal [4]. Certaines zones neuronales comme le lobe pariétal supérieur et le gyrus angulaire gauche semblent sous-activées ou lésionnées (Dehaene *et al.*, 2003). La dyscalculie peut s'accompagner d'une phobie des mathématiques ainsi que d'autres troubles, du comportement comme de la lecture ou de l'attention.

Comment utiliser les recherches neuroscientifiques pour l'enseignement des mathématiques et remédier aux troubles de la dyscalculie ? C'est la question que pose Butterworth *et al.* (2011) tout en admettant qu'il n'est pas aujourd'hui possible de proposer des remédiations types, car si l'on

[1] « *However, they [the studies relied on fMRI] cannot answer research questions about what "goes wrong" in the dyslexic brain, although they can help to rule out hypotheses* » (Goswami, 2008b), ce qui n'empêche pas les fervents adeptes de la *Brain Gym* de créer des exercices physiques censés améliorer les problèmes quotidiens des dyslexiques (d'ailleurs également valables pour l'hyperactivité et le déficit d'attention).

[2] Pour une approche plus détaillée, lire l'article de Wilson (2005).

[3] Voir le Dyscalculia Screener mis au point par Butterworth en 2004. Voir aussi son site personnel, The mathematical Brain.

[4] Il existerait autant de dyscalculiques que de dyslexiques, à savoir 3 % à 7 % de la population. Malheureusement, pour des raisons budgétaires, les avancées scientifiques dans ce domaine sont moins rapides.

❶ Ensemble des caractères observables d'un individu. Le phénotype correspond à la réalisation du génotype (expression des gènes) mais aussi des effets du milieu, de l'environnement.

❷ Voir aussi le rapport britannique de 2009 de Dowker sur les méthodes efficaces de remédiation.

sait diagnostiquer un déficit de la numératie, on ne sait pas identifier le phénotype ❶ cognitif responsable du trouble. Ils ajoutent : « *although the neuroscience may suggest what should be taught, it does not specify how it should be taught*. » Dans un autre article, Butterworth et Laurillard (2010) reprochent aux neurosciences le manque de coordination avec les sciences de l'éducation (dû en parties aux différentes méthodologies et aux interférences de nombreuses variables) et leur incapacité à produire des interventions pédagogiques de remédiation. Les résultats des recherches peuvent cependant guider certaines interventions en montrant l'importance par exemple du comptage de points sur des dominos ou dans des figures aléatoires pour la compréhension des nombres, et donc de l'arithmétique. Dans tous les cas, les scientifiques préconisent des interventions ciblées et personnalisées ❷. Une autre piste intéressante est présentée par Kaufmann (2008) dans une étude sur la **gnosie des doigts** : il semblerait que l'incapacité chez des enfants d'âge préscolaire d'utiliser ses doigts pour compter et calculer (agnosie des doigts) pourrait se traduire par des troubles de la numératie.

Dyspraxie

La **dyspraxie** correspond à un trouble spécifique de l'apprentissage non verbal qui « *perturbe l'exécution motrice d'un geste intentionnel* » (Vaivre-Douret, 2007). Comme pour les autres troubles, cette perturbation ne peut s'expliquer par un retard mental ou un déficit sensoriel. Ce trouble concernerait 5 % à 7 % des enfants de 5 à 11 ans, selon le Haut comité de santé publique.

La **dyspraxie développementale** est plus que le trouble de la coordination motrice puisqu'elle implique la planification, la programmation et la coordination/exécution de gestes complexes, étapes commandées par différentes aires cérébrales. Il n'existe pas moins de six types de dyspraxie selon la nature du geste affecté, qui peuvent se trouver associés chez certains dyspraxiques. Leurs causes ne sont pas encore connues, mais plusieurs chercheurs évoquent la prématurité, des troubles des connexions cérébrales, des dysfonctionnements de certaines zones cérébrales, ou encore des troubles neurovisuels, ce qui semblerait la piste la plus probable actuellement (Vaivre-Douret, 2007). Certains chercheurs tentent de cerner également la définition même de la dyspraxie, en essayant de voir ce qui la distingue d'un trouble développemental de la coordination et en se limitant à une approche pratique de cette définition (voir l'introduction du n° 111 de la revue ANAE).

Certains gestes complexes ne seront jamais automatisés chez les dyspraxiques et cela peut avoir des conséquences sur l'écriture, mais aussi sur les jeux de construction, le vélo, le dessin, etc. Les troubles associés à la dyspraxie peuvent être (mais ce n'est pas toujours le cas, ce qui pose là encore un problème de diagnostic et de définition précise) la dysgraphie, la dyscalculie, la dyslexie, la dysorthographie, ou des troubles de l'orientation dans l'espace.

Prise en charge de la dyspraxie : à l'école un peu, à l'extérieur surtout

La dyspraxie se traduit **sur le plan scolaire** par des difficultés à structurer spatialement un cahier ou à retirer des informations d'un document ou d'un schéma, notamment en géométrie, à suivre les lignes sans en sauter une seule, à dénombrer sans se tromper, etc. Le diagnostic peut (et devrait) être posé dès 4 ans. Des aménagements sont possibles pour les dyspraxiques à l'école (dans le cadre d'un PAI, projet d'accueil individualisé, ou d'un PPS, projet personnalité de scolarisation, voir le guide ressources INPES pour les parents « Troubles "dys" de l'enfant »), par le recours à un accompagnateur de vie scolaire (AVS), par l'utilisation préférentielle de l'oral, sous forme de comptines par exemple pour se repérer dans l'espace et faire les gestes de manière un peu plus automatisée, utiliser l'ordinateur en classe et à la maison. Mais des prises en charges orthophonique et orthoptique, voire psychothérapique, s'avèrent souvent nécessaires, puisque ce trouble n'est en général pas isolé (voir notamment pour plus de détails le site de l'association Dyspraxique mais fantastique).

L'ENFANT DANS UN ENVIRONNEMENT PROPICE AUX APPRENTISSAGES

Les résultats en neurosciences, même s'ils ne portent pas *a priori* directement sur l'éducation ou l'apprentissage, peuvent aussi être utilisés en contexte scolaire. C'est le cas des découvertes sur le rôle très important des émotions sur le fonctionnement du cerveau, ou encore de la manière dont le cerveau se développe dans les premières années de vie.

Prise en compte de l'apprenant

Les notions de bien-être à l'école, de climat scolaire ❶, d'attitude des élèves face à l'école, d'émotions « positives » ou « négatives » ressenties à l'école, d'espace d'apprentissage... et leur rapport avec la performance des élèves fleurissent depuis quelques années et sont devenus des axes de recherche en éducation, des passages obligés des enquêtes internationales, ou des points forts de la politique éducative de certains pays (volume IV de l'enquête PISA 2009, publié par l'OCDE en 2011 ; voir aussi « Favoriser le bien-être des élèves, condition de la réussite éducative », note d'analyse n° 313 du Centre d'analyse stratégique). Que peuvent apporter les neurosciences cognitives à ces questions d'actualité ?

Environnement ou contexte d'apprentissage

Comme nous l'avons dit plus haut, l'environnement joue un rôle majeur dans le développement du cerveau et dans sa plasticité, donc *a priori* dans les processus d'apprentissage. Lieury (2010) définit l'environnement comme un ensemble de facteurs biologiques (comme l'alimentation, le sommeil, l'exercice physique) et de **facteurs psychologiques**, comme les stimulations sensori-motrices, affectives, sociales, parentales, économiques, etc. Il faut considérer selon lui l'élève dans son **milieu cognitif et culturel** : « *les conditions d'éducation déterminent de manière définitive le statut intellectuel et social de l'individu* » (Lieury, 2010). Dans la plupart des recherches consacrées au bien-être à l'école, cet environnement d'apprentissage inclut également l'espace d'apprentissage, à savoir l'environnement physique qui entoure les élèves, qui semble jouer un rôle dans les pratiques pédagogiques mises en œuvre et dans l'effet-établissement (Musset, 2012).

Dans ces domaines, les recommandations des neuroscientifiques restent très générales et « *semblent tellement évident[e]s qu'on a tendance à négliger leur importance* ❷. *Il faut adopter une approche globale, qui tienne compte des liens étroits entre bien-être physique et intellectuel et ne néglige pas l'interaction entre aspects émotionnels et cognitifs* » (CERI, 2007). Mais pour Howard-Jones (2008), ceci est trop vague et les questions principales restent en suspens : les processus d'apprentissage sont-ils influencés par le contexte ? À quel stade du développement cérébral ? Et par quels chemins ? **Aucune théorie ne répond aujourd'hui à l'ensemble de ces questions**, d'autant plus quand l'apprentissage est abordé dans son contexte social, ce qui est bien entendu le cas à l'école.

Le cerveau de l'adolescent

Importance de la prise en compte du mindset, « l'état d'esprit » de l'apprenant

L'attitude des élèves face à l'école dépend également de leurs émotions, de leur motivation ❸ et de l'état d'esprit avec lequel ils abordent l'école. Pour les neuroscientifiques, la distinction entre les **éléments cognitifs, émotionnels et physiologiques de l'apprentissage** n'est que purement analytique et théorique : ces trois types d'éléments sont indissociablement liés (CERI, 2007 ; voir aussi Immordino-Yang & Damasio, 2007). Les éléments émotionnels recouvrent, outre les émotions, l'attention, le stress, la motivation, les notions de récompense et de punition. Pour l'**attention**, trois réseaux fonctionnant en parallèle ont été mis en évidence : un chargé de maintenir l'esprit en éveil, un

❶ On peut consulter à ce propos les références mises en lumière par l'ESEN sous le titre « Climat scolaire et qualité des apprentissages ».

❷ À titre d'exemple, ces auteurs préconisent un petit-déjeuner riche en sucres lents pour les enfants, font part de résultats encourageants pour la prise d'acides gras chez des dyspraxiques (rappelant par là la célèbre cuillerée d'huile de foie de morue !), incitent à « *ouvrir les fenêtres de temps en temps, et ménager des pauses pour que chacun puisse s'étirer et respirer, [ce qui] ne nuirait probablement pas aux performances des élèves* », à baisser le niveau sonore des établissements, ou encore à faire en sorte que les élèves dorment bien la nuit...

❸ « *La motivation est la résultante de deux besoins fondamentaux : le besoin de se sentir compétent (compétence perçue) et le besoin d'autodétermination (libre arbitre)* » (Lieury, 2010).

pour gérer l'information sensorielle et un chargé d'arbitrer entre plusieurs processus mentaux ou émotions (CERI, 2007). Ces réseaux ont pour fonction d'influencer les autres aires fonctionnelles. De nombreuses études sur l'attention visent par exemple à mieux comprendre le fonctionnement cérébral des élèves hyperactifs❶.

Pour les **émotions**, dans le cas de la peur par exemple, le rôle de l'amygdale et du lobe préfrontal semblent s'affirmer : dans un circuit court, l'amygdale est directement stimulée et déclenche les réactions corporelles de la peur ; dans un circuit long, le lobe préfrontal régule (renforce ou freine) la fonction amygdalienne. Pour le **plaisir**, l'aire tegmentale ventrale (située dans le tronc cérébral), l'accumbens (située à l'avant du cerveau) et la dopamine seraient les composantes neurobiologiques essentielles de cette émotion (Lotstra, 2002). D'autres études (voir Posner *et al.*, 2009) n'abordent pas les aires fonctionnelles directement, mais mettent plutôt en avant deux variables centrales pour l'étude des émotions : le caractère positif ou négatif de l'émotion ressentie (*valence* en anglais) et la stimulation ou la mise en action corporelle de cette émotion, allant de l'état végétatif à une excitation extrême (*arousal* en anglais).

Les réseaux liés à l'attention et aux émotions se développent durant l'enfance par auto-régulation. Elle permet à l'enfant de se concentrer sur une tâche précise et de contrôler ses émotions, notamment son **stress**. Cette auto-régulation et le climat d'apprentissage scolaire sont à la base de la motivation des élèves et de leur attitude envers l'école, et *a priori* de leur réussite scolaire (CERI, 2007).

Le style d'apprentissage VAK
Le concept de connectivité, bien plus que celui d'indépendance des fonctions cérébrales, revêt de l'importance pour l'enseignement : les pédagogies basées sur un traitement bimodal de l'information (voir et entendre la même l'information au même moment est plus efficace que de la voir dans un premier temps puis de l'entendre), souvent utilisées par les enseignants de la petite enfance, sont menacées par les théories sur les styles d'apprentissage de type VAK (visuel, auditif, kinesthésique). Malgré les mises en garde répétées contre les théories des styles (Coffield *et al.*, 2004), ce type d'approche est encore utilisé dans de nombreux dispositifs de formation ou d'enseignement et certaines écoles ont même affublé des élèves des lettres V, A ou K afin de mieux les distinguer dans les classes.
La supposition implicite ici est de dire que l'information n'est traitée que par un seul canal perceptif, indépendamment des autres canaux, ce qui va totalement à l'encontre de ce que l'on sait sur l'interconnectivité du cerveau (voir Geake, 2008 et Howard-Jones, 2010b).

Le cas de la petite enfance

De l'importance de l'élagage

La carte génétique de chaque enfant conduit à la formation d'un maillage cérébral de base à partir du troisième mois de la gestation ❷. L'activité cérébrale se met en place et le système nerveux se développe et est accompagné par la migration des neurones vers leurs zones dédiées. Après cinq mois, les mouvements du fœtus deviennent plus précis et les dendrites et axones se déploient. **L'architecture du cerveau humain se construit donc avant même la naissance et les neurones se sont organisés de façon à constituer le cortex et d'autres structures cérébrales**. Peu après la naissance, le nombre de synapses explose littéralement et, au bout d'un an, le bébé possède deux fois plus de connexions qu'un adulte. Puis, graduellement durant l'enfance, le nombre de synapses décline par effet d'élagage déclenché par l'influence de l'expérience. Ce processus constitue le facteur clé de la plasticité du cerveau et de ses capacités d'adaptation à son environnement (cela rejoint la survie de l'espèce, voir Oates *et al.*, 2012).

❶ Lorsque l'attention d'un élève fait défaut, on parle de trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA/H) qui comprend le déficit attentionnel, l'hyperactivité motrice ou l'impulsivité (voir le guide pratique « Difficultés et troubles des apprentissages chez l'enfant à partir de 5 ans », édité par la Société française de pédiatrie en 2009).

❷ - Près de 250 000 neurones sont formés toutes les minutes pendant les quatre premiers mois de gestation ;
- la construction du cerveau est un processus de longue durée qui commence avant la naissance et se prolonge au moins jusqu'à l'adolescence ;
- les expériences faites par le jeune enfant jouent un rôle essentiel dans l'élagage et la stabilisation des circuits neuronaux ;
- certaines parties du cerveau du nouveau-né sont plus actives pendant le sommeil qu'en période de veille ;
- le sommeil est essentiel pour la stabilisation des informations dans la mémoire à long terme ;
- pour les enfants orphelins entre 0 et 2 ans, le placement en famille d'accueil réduit les retards de développement.

Cet élagage sélectif constitue un réglage structurel et fonctionnel du cerveau permettant ainsi aux réseaux de neurones constitués de s'adapter et de faciliter l'apprentissage. Le développement neurobiologique s'affine et l'enfant devient capable de réagir et d'établir une relation. Ce « câblage » de neurones et son circuit doté de possibilités de connexions infinies sont uniques pour chaque enfant et sont constitués d'une combinaison de facteurs génétiques et environnementaux. Pour Dehaene et Changeux, seules les synapses stabilisées et/ou consolidées par l'usage seront conservées (cités dans CERI, 2007).

La plasticité du jeune cerveau

Certains chercheurs ont montré, chez les animaux mais aussi chez les humains, que la formation synaptique rapide dans le cortex visuel débute avant la naissance. D'autres expériences effectuées sur de jeunes singes ont également montré que le taux de formation synaptique et la densité synaptique à la naissance ne sont pas affectés par la quantité de stimulation reçue, que ce soit par excès ou par défaut : « *Contrairement à ce que suggère le mythe, la formation rapide de synapses au début du développement semble commandée par le programme génétique, et non par l'environnement* » (Bruer, 2002). Cependant, d'autres études décèlent chez les enfants ayant connu des périodes de privations psychosociales, comme c'est le cas dans certains orphelinats, un métabolisme cérébral ralenti dans la région du lobe préfrontal et une réduction des matières grises et blanches. Par contre, les enfants placés directement dans des familles d'accueil entre 0 et 2 ans ne montrent quasiment aucune perturbation de ces zones. L'impact le plus important se situe au niveau des potentiels évoqués, très réduits chez les enfants orphelins non placés, qui n'ont peu ou pas de contacts humains [1] (effets encore bien plus néfastes quand l'enfant est négligé ou maltraité).

[1] On retrouve ici les contradictions amenées par l'opposition inné/acquis, voir plus haut.

Tout se joue avant 3 ans

Les ouvrages de vulgarisation scientifique insinuent que les 3 premières années du jeune enfant représentent la période critique de la formation du cerveau et que les connexions neuronales se créent tous-azimuts grâce à un environnement enrichi et un surcroît de stimulations. Pour les parents, les structures d'accueil et les pouvoirs publics, cela représente « *une possibilité d'action unique, une fenêtre temporelle, biologiquement déterminée pendant laquelle il est possible d'agir sur le cerveau par des expériences et des actions adéquates* » (Bruer, 2002). L'origine du mythe se situe au XVIIIe siècle, lorsque les femmes issues de riches familles urbaines européennes, désormais débarrassées des labeurs domestiques, se voyaient confier le sort de leurs enfants. On croyait alors que seuls l'amour et les soins maternels pouvaient façonner à jamais le destin des enfants. « *Trois siècles plus tard, cette conception culturellement déterminée de ce qui est naturel et de ce qui ne l'est pas (mêlant facilement et dans une certaine confusion, ce qui relève du biologique et du culturel) continue à piéger les parents, et surtout les mères, engendrant conflits et culpabilité* » (Bruer, 2002). Les parents, s'ils veulent aider leur enfant, doivent stimuler leur bébé, l'entourer d'objets insolites, lui faire écouter de la musique (Mozart si possible). Toutes ces allégations font naître chez les parents et à divers degrés, un sentiment de culpabilité, de stress voire d'incompétence (si mon enfant ne réussit pas dans la vie, c'est de ma faute). Les enfants qui seraient privés de stimulations neuronales seraient alors voués à l'échec scolaire, voire pire ! Et pourtant, il n'existe pas aujourd'hui « *de données neuroscientifiques concluantes sur la relation prédictive entre la densité synaptique du premier âge et l'amélioration de la capacité d'apprentissage* » (CERI, 2007).

En 1997, H. Clinton, devant un parterre de professionnels de l'éducation réunis à la Maison blanche, a dit : « *It is clear that by the time most children start preschool, the architecture of the brain has essentially been constructed* ». Cette conférence, donnée à l'occasion de la « *decade of the brain* », est depuis citée comme un grand moment dans l'histoire de ce neuromythe (Howard-Jones *et al.*, 2012).

Les programmes pour la petite enfance

Les thèses défendues pour la mise en place de programmes pour les très jeunes enfants (de 4 à 6 ans), par exemple le programme américain *Head Start* destiné à offrir aux enfants issus de familles défavorisées des environnements stimulants, sont fondées sur l'**importance accordée à la période initiale et aux pics de croissance cérébrale**. C'est une des répercussions liées aux théories véhiculées par le mythe du « tout se joue avant 3 ans » : les premières stimulations que l'enfant reçoit au contact de son environnement seraient à l'origine de la croissance synaptique. Cette idée a été réfutée par des études scientifiques qui ont établi aujourd'hui que la **formation synaptique générale est déclenchée par le programme génétique** et non par les premières interactions avec l'environnement.

Face aux contradictions qui émergent des travaux sur l'importance des premières années de vie et de l'exposition aux environnements complexes, il est difficile de distinguer des recommandations cohérentes pour la mise en place de structures d'accueil préscolaires. D'un côté les recherches préconisent un **investissement massif dans l'apprentissage des jeunes enfants afin de leur apporter les stimulus nécessaires** au bon développement de leur circuit neuronal, ne pas le faire ayant des conséquences néfastes pour la suite de leur parcours scolaire et social. D'un autre, on peut lire qu'**il n'existe aucune preuve sur l'efficacité des environnements enrichis** (seules les privations sensorielles et sociales auraient un impact négatif, voir Goswami, 2005). Enfin, pour les experts de l'OCDE, le développement d'un enfant exige une interaction, des modèles et un soutien positif de lui fournir un environnement correspondant à ces critères [1] (OCDE, 2007). Dans tous les cas, c'est le **contexte social et émotionnel** qui impacte l'apprentissage, rien de bien original dans le paysage des recommandations pour le bien-être des enfants et des humains en général (Gaussel, 2011).

[1] Les éléments considérés comme nuisant au développement de l'enfant peuvent se résumer ainsi :
- les situations de conflits, les mauvais traitements, les attitudes négatives envers l'enfant ;
- le manque de soins et le fait de ne pas assurer les besoins élémentaires (santé, nourriture, sécurité, attention) ;
- le manque d'interactions, de conversations, de jeux, de stimulations ;
- une ambiance sociale et familiale négative ou dégradée.

QUELQUES PISTES DE RECHERCHE

Des neuroscientifiques appréhendant de front le processus d'enseignement ou des tentatives récentes de travaux de recherche en éducation utilisant directement la neuro-imagerie, voilà deux exemples d'exploration intéressants par leur approche inhabituelle en recherches en éducation.

La neuro-pédagogie ou le *teaching brain*

Une piste de recherche actuelle en neurosciences cognitives (voir les dossiers réguliers consacrés à ce sujet de la revue *Mind, Brain, and Education* depuis 2010) s'intéresse à l'enseignement vu du côté biologique, et cherche à caractériser la capacité du cerveau humain à enseigner. Battro (2010) et Rodriguez (2012) partent ainsi de l'idée que l'enseignement serait une capacité cognitive naturelle et qu'elle commencerait très tôt puisque, d'après eux, tous les enfants enseignent spontanément. Affirmant que l'enseignement est un **processus dynamique d'engagement de l'enseignant en vue de développer l'apprentissage**, Rodriguez (2012) aborde l'enseignement comme un système dynamique complexe. Elle propose un modèle de « cerveau enseignant » calqué sur le fonctionnement du système nerveux et présentant trois grandes fonctions : la perception de l'apprenant dans son contexte, le traitement de l'information (ou *processing*) centré sur l'apprenant ou sur l'enseignant lui-même et la réponse de l'enseignant (Rodriguez, 2013). Les interactions entre enseignant et apprenant sont multiples et fondamentales dans ce modèle puisque des rétroactions sont faites par l'enseignant.

Les limitations de l'étude de l'activité enseignante en classe par neuro-imagerie, et qu'on imagine facilement puisque les appareils ne sont pas capables de mesurer l'activité du cerveau sur plus d'une personne à la fois, amènent les chercheurs à envisager de s'intéresser d'abord aux capacités enseignantes des jeunes enfants. Battro (2010) se demande à ce pro-

pos si ces **capacités cognitives naturelles d'enseignement**, dont la définition reste à préciser (puisque les recherches en éducation ont établi depuis longtemps que l'enseignement n'est pas inné mais s'apprend), ne seraient pas plutôt ici les outils développés par les enfants lors de l'apprentissage par les pairs ou du tutorat. La définition de l'enseignement par les neuroscientifiques gagnerait donc à être davantage précisée dans ces contextes d'études très différents de la salle de classe.

La neurodidactique des sciences

Parmi les pistes possibles de l'utilisation de la neuro-imagerie dans les recherches en éducation, citons cette recherche originale en didactique des sciences de Masson *et al.* (2012). Ces auteurs situent le champ de la **neurodidactique des sciences** dans une branche de la neuro-éducation❶, la neurodidactique s'intéressant « *aux mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage et l'enseignement de disciplines scolaires* » (Masson, 2007). Dans le cadre de l'enseignement des sciences physiques, Masson *et al.* (2012) discutent de la faisabilité d'une expérience utilisant l'IRMf et portant sur le changement conceptuel ❷, sachant qu'il n'y a actuellement pas de consensus sur les différentes théories expliquant ce concept (voir pour plus de détails Treagust & Duit, 2009). D'après les premiers résultats des expériences sur ce sujet, un processus d'inhibition pourrait se mettre en œuvre chez les sujets experts (qui ont étudié les sciences physiques et donc effectué *a priori* les changements conceptuels), en plus de la représentation de la conception erronée, invalidant ainsi l'hypothèse d'un remplacement des conceptions erronées par des concepts scientifiques. L'expérience consiste à étudier l'activation des zones du cerveau par IRMf de 12 novices et 11 experts pendant leur réponse à un QCM présentant trois types de circuits électriques (corrects ou non). Dans leur conclusion, les auteurs proposent de commencer par généraliser l'étude de l'activité de cerveaux experts et novices à d'autres domaines de physique et de chimie, en variant également le degré d'expertise des sujets étudiés. La conclusion de cet article accorde à la neuro-imagerie une place parmi d'autres dans les outils possibles de didactique des sciences : « *All these limitations mentioned above lead to think that neuroimaging can't and won't ever replace traditional methods in education research.* » (Masson *et al.*, 2012)

VERS UNE NOUVELLE CULTURE SCIENTIFIQUE EN ÉDUCATION ?

Ce qui ressort des travaux de recherche en neurosciences cognitives, ce sont le foisonnement d'idées susceptibles d'être appliquées à l'éducation, les contraintes techniques qui freinent ou bloquent ce mouvement et l'intérêt toujours renouvelé des politiques éducatives pour des résultats scientifiquement fondés. Côté recherches en éducation, ignorer les avancées faites sur la compréhension des phénomènes d'apprentissage ne paraît plus être d'actualité pour certains chercheurs, qui voient alors les frontières qui séparaient naguère les sciences sociales de celles de la nature s'amenuiser. Faut-il choisir une nouvelle culture scientifique commune ? Sur quelles bases ? Des propositions émergent, notamment au niveau de la **formation et de l'information des chercheurs et des enseignants**. Ces propositions sont souvent faites du côté des neuroscientifiques pour les chercheurs en éducation et les enseignants, et non l'inverse, et partent souvent du principe (non remis en cause) que les études en neurosciences cognitives offrent une contribution forcément positive aux questions d'apprentissage.

Il semble important de préparer les jeunes docteurs en recherches en éducation à des méthodes de recherche scientifiques au sens large, c'est-à-dire incluant pour

❶ Les autres branches sont la neuro-adaptation scolaire (pour étudier « *le cerveau des élèves éprouvant des difficultés d'adaptation au système scolaire* ») et la neuropédagogie (s'intéressant aux « *mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage et l'enseignement* »). On pourra consulter plus haut les discussions concernant la neuro-éducation.

❷ Terme de didactique évoquant le changement qui a lieu en classe lorsque les élèves se défont de certaines idées paraissant spontanément vraies mais étant fausses scientifiquement : les conceptions.

Eisenhart et DeHaan (2005) une réflexion globale dans cinq grands domaines ❶ : perspectives épistémologiques, méthodologies et stratégies, prise en compte de divers contextes d'enseignement, principes d'investigation scientifique, recherches interdisciplinaires. Le programme de formation abordant ces domaines se décline en cours magistraux, en participation à des recherches, en périodes d'enseignement et en travaux interdisciplinaires.

Pour Tardif et Doudin (2011), une implantation trop hâtive dans la classe n'est pas souhaitable sans avoir au préalable établit un cadre de « co-construction » entre les deux champs, et ce pour deux raisons :

- le manque de connaissance en neurosciences cognitives de la part des acteurs du champ de l'enseignement qui pourraient être tentés d'appliquer des recommandations dont l'efficacité est encore peu prouvée scientifiquement ;
- l'éloignement des chercheurs en neurosciences cognitives des réalités d'une salle de classe pour comprendre les problèmes auxquels les enseignants sont confrontés et leurs attentes en termes d'efficacité.

Il serait donc bénéfique pour les chercheurs et les enseignants de se rencontrer afin que tous puissent prendre en compte les objectifs des uns et des autres.

Eisenhart et DeHaan (2005) proposent d'inclure des modules portant sur les méthodologies d'investigation scientifique dans la formation des enseignants. Suivant également cette idée, Tardif et Doudin (2011, voir aussi Ansari & Coch, 2006) distinguent quatre axes de formation pour permettre aux enseignants de développer une pensée critique : une connaissance de base en neurosciences (neurone, système nerveux, cortex, etc.), la dissipation des neuromythes, l'état de la recherche sur les troubles d'apprentissage (dyslexie, autisme, etc.), la recherche d'information ❷.

Cette nouvelle culture scientifique commune pourrait également se construire hors des domaines de la recherche ou de l'éducation, mais dans la société elle-même. Le rapport du Sénat (Claeys & Vialatte, 2012) montre en effet « *qu'un enseignement de ces problématiques [de bioéthique] dans le secondaire serait utile* » (le fonctionnement du cerveau est déjà au programme du lycée) et que, « *ainsi que l'avait remarqué François Berger [professeur de médecine] : "Ce qui ressort des débats citoyens dont il vient d'être question est une très belle leçon de démocratie. J'y étais plus ou moins opposé. Or les recommandations sont très rigoureuses. Elles ont réussi à intégrer la complexité du sujet et à se démarquer des lobbies et des discussions habituelles. J'ai l'impression que, lorsqu'un sociologue ou un philosophe discute avec un représentant des neurosciences, ils n'arrivent pas à communiquer. Or le citoyen a complètement résolu le problème. Ceci doit nous rendre vraiment optimistes".* »

D'après ce rapport, l'**information du citoyen** est nécessaire et passe par une meilleure qualité de la diffusion des résultats neuroscientifiques pour contrer « *les effets pervers d'informations sensationnelles laissant croire à des découvertes ouvrant à des traitements* », et par l'organisation de débats citoyens menés par des scientifiques.

En partant du postulat que « *there is not a clear science of education* », Stein *et al.* (2011, voir aussi Ansari & Coch, 2006) font le rapprochement entre la demande grandissante de la part du public et des politiques pour un système éducatif de qualité et la recherche en neurosciences qui semble à elle seule vouloir donner ses lettres de noblesse aux sciences de l'éducation. Le champ émergeant des **neurosciences de l'éducation** est aussi bien une réponse aux besoins de la société que l'extrapolation des progrès réalisés dans les domaines techniques. Sur un fond de mauvaises interprétations (les neuromythes), d'exploitations commerciales et d'implantation zélée et imprudente des résultats de la recherche, les chercheurs rappellent le besoin d'humilité et de précautions en termes de responsabilité épistémique engagée.

Pour mieux situer les problématiques concernant l'application par les politiques éducatives des résultats des neuros-

❶ Cet article fait suite au rapport « Scientific Research in Education » (paru en 2002) qui avait soulevé de nombreuses questions et suscité de nombreux débats.

❷ Ils ajoutent que, pour que les enseignants puissent assimiler l'information pertinente et augmenter leur autonomie face à ce sujet, il suffirait de leur donner accès aux bases de données d'articles en ligne et de suivre les conseils de formateurs, « *idéalement des scientifiques habiles à la vulgarisation* ». Cette idée de « neuro-éducateur » est reprise dans d'autres articles et correspond à « *a person explicitly devoted to bridging the gaps between neuroscience and education responsibly* » (voir Stein *et al.*, 2011).

ciences en classe, prenons l'exemple type de l'enseignement de la lecture et des débats houleux qui ont eu lieu en 2006 sur ce thème. Gilles de Robien, alors ministre de l'Éducation nationale, évoque dans un article de Libération les recherches en éducation comme « *de curieuses "sciences" souvent mêlées de forts a priori idéologiques* », heureusement remplacées pour lui par les neurosciences cognitives, incarnation de « *la science, la vraie, la science expérimentale* », qui apportent « *des réponses fermes confirmant bien souvent nos connaissances empiriques et l'explication rigoureuse qui nous manquait* ». Sur la question de la lecture et grâce aux neurosciences [1], « *on sait désormais non seulement que la méthode à départ syllabique est plus efficace, mais l'on sait pourquoi. Plus aucune fausse science ne pourra révoquer l'expérience* ». Ehrenberg (2008) dénonce le fait que les décisions politiques ne peuvent être prises sur « *la confusion conceptuelle et pratique qui règne sur ces questions* » et appelle à prendre le recul de la sociologie et de l'épistémologie pour appuyer les politiques éducatives et éviter de penser que « *c'est du laboratoire que sortiront les solutions* ».

Cette citation renvoie à un concept également troublant traité dans les ouvrages portant sur la neuro-éthique. Discipline émergente selon Dehaene (2009), la neuro-éthique couvre au moins deux champs : la « neuroscience de l'éthique » et « l'**éthique des neurosciences** » ou la **neuro-éthique appliquée**. C'est à cette dernière que s'intéressent Stein *et al.* (2011), qui énoncent quelques points de vigilance concernant l'éthique des recherches en neurosciences de l'éducation :

- le groupe témoin d'une expérience menée au sein d'un établissement sera désavantagé d'un point de vue éducatif (ce qui sous-entend que le programme soit efficace) ;
- la création de stéréotypes pour le besoin des expérimentations peut nuire aux élèves ;
- l'implication de *stakeholders* (les parties prenantes) et de moyens de financement peut biaiser les résultats ;
- la possibilité d'influer sur ou d'altérer un cerveau d'enfant peut bien sûr s'avérer dangereuse.

Sur ce dernier point, l'article de Stein *et al.* (2011) se révèle inquiétant. Avec son titre inspiré du roman *Le meilleur des mondes* de Huxley, écrit en 1931, il aborde la question de la **neuropharmacologie** [2] et du **mythe de l'élève parfait**, façonné pour correspondre aux besoins du système éducatif et faire ce que l'on attend de lui (être performant, discipliné et malléable [3]) : « *Designing children is a process in which an instrumental intervention changes behaviors, dispositions, and capabilities, affecting processes and mechanisms that change who the children will become* ». Avec les avancées du **biomédical** et de leurs applications pharmacologiques, il convient de s'interroger si les parents pourront un jour aider leurs enfants à être plus compétitifs en leur offrant un « kit de performance cognitive » biomédical (Stein *et al.*, 2011). Howard-Jones (2007) parle lui des « ***smart pills*** » (pilules de l'intelligence) qui devraient être accessibles au grand public d'ici 2017, selon un rapport de l'*Office of Science and Technology* britannique paru en 2008. Destinées dans un premier temps à aider les individus atteints de troubles cognitifs importants (en particulier les patients souffrant de la maladie d'Alzheimer), ces « *cogs* » pourraient également rendre les processus de mémorisation très performants chez de jeunes adultes sains. Le neuroscientifique Gazzaniga (dans Howard-Jones, 2007) s'est prudemment exprimé sur le sujet et s'en remet au bon sens des citoyens : « *The government should keep out of it, letting our own ethical and moral sense guide us through the new enhancement landscape* ».

[1] Voir également la tribune « Un point de vue scientifique sur l'enseignement de la lecture » signée par une vingtaine de chercheurs et le dossier sur la question du Café pédagogique.

[2] Définition très détaillée de la neuropharmacologie sur le site du *Center for Bioethics at the College of Physicians and Surgeons* de l'Université de Colombia.

[3] Lire à ce propos l'expérience mentionnée dans l'article de Stein *et al.* (2011), intitulée « Paula and Rick ».

BIBLIOGRAPHIE

La plupart des liens figurant dans ce Dossier renvoient vers les notices correspondantes dans notre bibliographie collaborative qui comprend les références complètes et les accès éventuels aux articles cités (libres ou payants selon les abonnements électroniques de votre institution).

- Adolphs Ralph (2010). « Conceptual challenges and directions for social neuroscience ». *Neuron*, vol. 65, n° 6, mars, p. 752-767.
- Agid Yves & Benmakhlouf Ali (2011). *Enjeux éthiques de la neuroimagerie fonctionnelle*. Avis n° 116. Paris : Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé.
- Andreano Joseph M. & Cahill Larry (2009). « Sex influences on the neurobiology of learning and memory ». *Learning and Memory*, vol. 16, n° 4, janvier, p. 248-266.
- Andrieu Bernard (2001). « Le mouvement des modèles en histoire et philosophie des neurosciences ». *Le Portique. Revue de philosophie et de sciences humaines*, n° 7, janvier.
- Ansari Daniel & Coch Donna (2006). « Bridges over troubled waters: Education and cognitive neuroscience ». *Trends in cognitive sciences*, vol. 10, n° 4, avril, p. 146-151.
- Ansari Daniel, De Smedt Bert & Grabner Roland H. (2012). « Neuroeducation-A critical overview of an emerging field ». *Neuroethics*, vol. 5, n° 2, août, p. 105-117.
- Arshavsky Yuri I. (2006). « "The seven sins" of the Hebbian synapse: Can the hypothesis of synaptic plasticity explain long-term memory consolidation? ». *Progress in neurobiology*, vol. 80, n° 3, octobre, p. 99-113.
- Battro Antonio M. (2010). « The teaching brain ». *Mind, Brain, and Education*, vol. 4, n° 1, p. 28-33.
- Berteletti Ilaria, Lucangeli Daniela, Piazza Manuela *et al.* (2010). « Numerical estimation in preschoolers ». *Developmental Psychology*, vol. 46, n° 2, mars, p. 545-551.
- Bouysse Viviane & Pétreau Gilles (2012). *Évaluation de la mise en œuvre, du fonctionnement et des résultats des dispositifs « PARLER » et « ROLL »*. Rapport n° 2012-129. Paris : Inspection générale de l'Éducation nationale.
- Bressoux Pascal & Zorman Michel (2009). « Présentation et évaluation du programme de prévention "Parler" : Parler apprendre réfléchir lire ensemble pour réussir ». Communication au colloque « Langages et réussite éducative : des actions innovantes ». En ligne : <http://www.cognisciences.com/IMG/parler-presentation-evaluation.pdf>.
- Bronner Gérald (2006). « L'acteur social est-il (déjà) soluble dans les neurosciences ? ». *L'année sociologique*, vol. 56, n° 2, p. 331-351.
- Bruer John T. (1997). « Education and the brain: A bridge too far ». *Educational Researcher*, vol. 26, n° 8, p. 4-16.
- Bruer John T. (2002). *Tout est-il joué avant trois ans ?* Paris : Odile Jacob.
- Butterworth Brian & Laurillard Diana (2010). « Low numeracy and dyscalculia: Identification and intervention ». *ZDM*, vol. 42, n° 6, octobre, p. 527-539.
- Butterworth Brian, Varma Sashank & Laurillard Diana (2011). « Dyscalculia: From brain to education ». *Science*, vol. 332, n° 6033, mai, p. 1049-1053.
- Cai Qing (2009). *Fonction de la région occipito-temporale ventrale dans la reconnaissance des mots écrits : Dans un cerveau atypique ou sous un format atypique*. Thèse, université Lumière-Lyon 2.
- Centre d'analyse stratégique (2010). *Nouvelles approches de la prévention en santé publique. L'apport des sciences comportementales, cognitives et des neurosciences*. Paris : Centre d'analyse stratégique.
- Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement (CERI) (2002). *Comprendre le cerveau : Vers une nouvelle science de l'apprentissage*. Paris : OCDE.
- Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement (CERI) (2007). *Comprendre le cerveau : Naissance d'une science de l'apprentissage*. Paris : OCDE.
- Chamak Brigitte (2011). « Dynamique d'un mouvement scientifique et intellectuel aux contours flous : les sciences cognitives (États-Unis, France) ». *Revue d'histoire des sciences humaines*, vol. 25, n° 2, p. 13-33.
- Changeux Jean-Pierre (2002). *L'Homme de Vérité*. Paris : Odile Jacob.
- Claeys Alain & Vialatte Jean-Sébastien (2012). *L'impact et les enjeux des nouvelles technologies d'exploration et de thérapie du cerveau*. Rapport n° 476. Paris : Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

- Coffield Franck, Moseley David, Hall Elaine & Ecclestone Kathryn (2004). *Should we be using learning styles? What research has to say to practice*. Londres : The Learning and Skills Research Center.
- Cordier Françoise & Gaonac'h Daniel (2004). *Apprentissage et mémoire*. São Paulo : Edicoes Loyola.
- Crahay Marcel (2010). *Psychologie de l'éducation*. Paris : Presses universitaires de France.
- Danon-Boileau Laurent (2010). « La dysphasie, son incidence sur le processus psychique de l'enfant et sa prise en charge ». *Enfance et psy*, vol. n° 47, n° 2, juin, p. 115-127.
- Davis Andrew (2004). « The credentials of brain-based learning ». *Journal of Philosophy of Education*, vol. 38, n° 1, p. 21-36.
- Delahaie Marc (2004). *L'évolution du langage chez l'enfant : De la difficulté au trouble*. Paris : Éditions INPES.
- De Smedt Bert, Ansari Daniel, Grabner Roland H. *et al.* (2010). « Cognitive neuroscience meets mathematics education ». *Educational Research Review*, vol. 5, n° 1, p. 97-105.
- Dehaene Stanislas (2007). *Les neurones de la lecture*. Paris : Odile Jacob.
- Dehaene Stanislas (2009). *La neuroéthique, une nouvelle frontière pour les sciences humaines* [La Vie des idées]. En ligne : <http://www.laviedesidees.fr/La-neuroethique-une-nouvelle.html>.
- Dehaene Stanislas (2011). *Apprendre à lire. Des sciences cognitives à la salle de classe*. Paris : Odile Jacob.
- Dehaene Stanislas (2012). « Que nous apprennent les neurosciences sur les meilleures pratiques pédagogiques ? ». *Regards croisés sur l'économie*, vol. n° 12, n° 2, janvier, p. 231-244.
- Dehaene Stanislas, Piazza Manuela, Pinel Philippe & Cohen Laurent (2003). « Three parietal circuits for number processing ». *Cognitive neuropsychology*, vol. 20, n° 3, mai, p. 487-506.
- Della Sala Sergio & Anderson Mike (2012). *Neuroscience in education: The good, the bad, and the ugly*. Oxford : Oxford University Press.
- Dworczak Fabien (2004). *Neurosciences de l'éducation : cerveau et apprentissage*. Paris : L'Harmattan.
- Écalle Jean & Magnan Annie (2005). « L'apport des sciences cognitives aux théories du développement cognitif : quel impact pour l'étude des apprentissages et de leurs troubles ? ». *Revue française de pédagogie*, n° 152, p. 5-9.
- Ehrenberg Alain (2008). « Le cerveau "social" : chimère épistémologique et vérité sociologique ». *Esprit*, n° 1, janvier, p. 79-103.
- Eisenhart Margaret & DeHaan Robert L. (2005). « Doctoral preparation of scientifically based educational researchers ». *Educational Researcher*, vol. 34, n° 4, mai, p. 3-13.
- Eustache Francis & Desgranges Béatrice (2010). *Les chemins de la mémoire*. Paris : Éd. du Pommier.
- Fayol Michel (2012). *L'acquisition du nombre*. Paris : Presses universitaires de France.
- Feyfant Annie & Gaussel Marie (2007). « Méthodes de lecture et difficultés d'apprentissage ». *Dossier d'actualité VST-INRP*, n° 31, novembre. Lyon : Institut national de recherche pédagogique.
- Fodor Jerry A. (1986). *La modularité de l'esprit : Essai sur la psychologie des facultés*. Paris : Éd. de Minuit.
- Forlot Gilles & Beaucamp Jacques (2008). « Heurs et malheurs de la proximité linguistique dans l'enseignement de l'anglais au primaire ». *Ela. Études de linguistique appliquée*, n° 149, p. 77-92.
- Frost Ram (2012). « Towards a universal model of reading ». *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 35, n° 5, p. 263-279.
- Gaussel Marie (2011). « L'éducation à la santé (volet 1) ». *Dossier d'actualité Veille & Analyses IFÉ*, n° 69, décembre. Lyon : École normale supérieure de Lyon.
- Geake John (2008). « Neuromythologies in education ». *Educational Research*, vol. 50, n° 2, p. 123-133.
- Gong Gaolang, He Yong & Evans Alan C. (2011). « Brain connectivity: Gender makes a difference ». *The Neuroscientist*, vol. 17, n° 5, octobre, p. 575-591.
- Goswami Usha (2005). « The brain in the classroom? The state of the art ». *Developmental Science*, vol. 8, n° 6, p. 467-469.
- Goswami Usha (2006). « Neuroscience and education: From research to practice? ». *Nature Reviews Neurosciences*, vol. 7, n° 5, mai, p. 406-413.

- Goswami Usha (2008a). « Principles of learning, implications for teaching: A cognitive neuroscience perspective ». *Journal of Philosophy of Education*, vol. 42, n° 3-4, p. 381-399.
- Goswami Usha (2008b). « Reading, dyslexia and the brain ». *Educational Research*, vol. 50, n° 2, p. 135-148.
- Grainger Jonathan, Dufau Stéphane, Montant Marie *et al.* (2012). « Orthographic processing in baboons (Papio papio) ». *Science*, vol. 336, n° 6078, avril, p. 245-248.
- Han Xiaoning, Chen Michael, Wang Fushun *et al.* (2013). « Forebrain engraftment by human glial progenitor cells enhances synaptic plasticity and learning in adult mice ». *Cell Stem Cell*, vol. 12, n° 3, mars, p. 342-353.
- Hillman Charles H., Erickson Kirk I. & Kramer Arthur F. (2008). « Be smart, exercise your heart: Exercise effects on brain and cognition ». *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 9, n° 1, janvier, p. 58-65.
- Hinton Christina & Fischer Kurt W. (2010). « Perspective développementale et biologique de l'apprentissage ». In CERI, *Comment apprend-on ? La recherche au service de la pratique*. Paris : OCDE, p. 121-142.
- Houdé Olivier (2008). *Les 100 mots de la psychologie*. Paris : Presses universitaires de France.
- Howard-Jones Paul (2007). *Neuroscience and education: Issues and opportunities. A commentary by the teaching and learning research programme*. Londres : Institute of Education.
- Howard-Jones Paul (2008). « Philosophical challenges for researchers at the interface between neuroscience and education ». *Journal of Philosophy of Education*, vol. 42, n° 3-4, p. 361-380.
- Howard-Jones Paul (2009). « Scepticism is not enough ». *Cortex*, vol. 45, n° 4, avril, p. 550-551.
- Howard-Jones Paul (2010a). *Introducing neuroeducational research: Neuroscience, education and the brain from contexts to practice*. New-York : Routledge.
- Howard-Jones Paul (2010b). *Education and neuroscience: Evidence, theory and practical application*. New-York : Routledge.
- Immordino-Yang Mary Helen & Damasio Antonio (2007). « We feel, therefore we learn: The relevance of affective and social neuroscience to education ». *Mind, Brain, and Education*, vol. 1, n° 1, p. 3-10.
- INSERM (dir.) (2007). *Dyslexie, dysorthographie, dyscalculie : Bilan des données scientifiques.* Paris : Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM).
- Kail Michèle (2012). *L'acquisition du langage*. Paris : Presses universitaires de France.
- Karmiloff-Smith Annette & Thomas Michael (2005). « Les troubles du développement viennent-ils confirmer les arguments de la psychologie évolutionniste ? Une approche neuro-constructiviste ». *Revue française de pédagogie*, vol. 152, n° 1, p. 11-19.
- Kaufmann Liane (2008). « Dyscalculia: Neuroscience and education ». *Educational Research*, vol. 50, n° 2, p. 163-175.
- Kubit Benjamin & Jack Anthony I. (2013). « Rethinking the role of the rTPJ in attention and social cognition in light of the opposing domains hypothesis: Findings from an ALE-based meta-analysis and resting-state functional connectivity ». *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, article n° 323, p. 1-18.
- Lahire Bernard (2013). *Dans les plis singuliers du social : Individus, institutions, socialisations*. Paris : La Découverte.
- Leonard Christiana M., Towler Stephen, Welcome Suzanne *et al.* (2008). « Size matters: Cerebral volume influences sex differences in neuroanatomy ». *Cerebral Cortex*, vol. 18, n° 12, décembre, p. 2920-2931.
- Lieury Alain (2003). « Mémoire et apprentissages scolaires ». *Ela. Études de linguistique appliquée,* n° 130, p. 179-186.
- Lieury Alain (2010). *Introduction à la psychologie cognitive*. Paris : Dunod.
- Lieury Alain (2012). *Mémoire et réussite scolaire* [4e éd.]. Paris : Dunod.
- Lindell Annukka K. & Kidd Evan (2011). « Why right-brain teaching is half-witted: A critique of the misapplication of neuroscience to education ». *Mind, Brain, and Education*, vol. 5, n° 3, p. 121-127.
- Lotstra Françoise (2002). « Le cerveau émotionnel ou la neuroanatomie des émotions ». *Cahiers critiques de thérapie familiale et de pratiques de réseaux*, n° 29, octobre, p. 73-86.
- Masson Steve (2007). « Enseigner les sciences en s'appuyant sur la neurodidactique des sciences ». In Potvin Patrice, Riopel Martin & Masson Steve (dir.), *Regards multiples sur l'enseignement des sciences*, p. 308-321.

- Masson Steve, Potvin Patrice, Riopel Martin *et al.* (2012). « Using fMRI to study conceptual change: Why and how? ». *International Journal of Environmental and Science Education*, vol. 7, n° 1, janvier, p. 19-35.
- McCabe David P. & Castel Alan D. (2008). « Seeing is believing: The effect of brain images on judgments of scientific reasoning ». *Cognition*, vol. 107, n° 1, avril, p. 343-352.
- McDaniel Michael A. (2005). « Big-brained people are smarter: A meta-analysis of the relationship between in vivo brain volume and intelligence ». *Intelligence*, vol. 33, n° 4, juillet, p. 337-346.
- Meltzoff Andrew N., Kuhl Patricia K., Movellan Javier & Sejnowski Terrence J. (2009). « Foundations for a new science of learning ». *Science*, vol. 325, n° 5938, juillet, p. 284-288.
- Meyer Anne & Rose David H. (2000). « Universal design for individual differences ». *Educational Leadership*, vol. 58, n° 3, novembre, p. 39-43.
- Molko Nicolas, Wilson Anna & Dehaene Stanislas (2005). « La dyscalculie développementale, un trouble primaire de la perception des nombres ». *Revue française de pédagogie*, n° 152, p. 41-48.
- Musset Marie (2012). « De l'architecture scolaire aux espaces d'apprentissage : au bonheur d'apprendre ? ». *Dossier d'actualité Veille & Analyses IFÉ*, n° 75, mai. Lyon : École normale supérieure de Lyon.
- National Research Council (2002). *Scientific Research in Education*. Washington : The National Academies Press.
- Oates John, Karmiloff-Smith Annette & Johnson Mark (dir.) (2012). *Developing Brains*. Milton Keynes : The Open University.
- OCDE (2007). *Petite enfance, grands défis II : Éducation et structures d'accueil*. Paris : OCDE.
- Pasquinelli Elena (2012). « Neuromyths: Why do they exist and persist? ». *Mind, Brain, and Education*, vol. 6, n° 2, p. 89-96.
- Petit Laurent (2006). « Interactions et spécialisations entre certains systèmes de mémoire. » In *La mémoire*. Paris : Presses universitaires de France, p. 108-122.
- Plas Régine (2011). « La psychologie cognitive française dans ses relations avec les neurosciences. Histoire, enjeux et conséquences d'une alliance ». *Revue d'histoire des sciences humaines*, vol. n° 25, n° 2, mars, p. 125-142.
- Poldrack Russell A (2012). « The future of fMRI in cognitive neuroscience ». *NeuroImage*, vol. 62, n° 2, août, p. 1216-1220.
- Posner Jonathan, Russell James A., Gerber Andrew *et al.* (2009). « The neurophysiological bases of emotion: An fMRI study of the affective circumplex using emotion-denoting words ». *Human Brain Mapping*, vol. 30, n° 3, mars, p. 883-895.
- Ramus Franck (2005). « De l'origine biologique de la dyslexie ». *Psychologie et éducation*, n° 60, p. 81-96.
- Ramus Franck (2012). « L'intelligence humaine, dans tous ses états ». *Cerveau & psycho*, n° 9, avril, p. 4-8.
- Rasch Björn H., Born Jan & Gais Steffen (2006). « Combined blockade of cholinergic receptors shifts the brain from stimulus encoding to memory consolidation ». *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 18, n° 5, mai, p. 793-802.
- Rodriguez Vanessa (2012). « The teaching brain and the end of the empty vessel ». *Mind, Brain, and Education*, vol. 6, n° 4, p. 177-185.
- Rodriguez Vanessa (2013). « The human nervous system: A framework for teaching and the teaching brain ». *Mind, Brain, and Education*, vol. 7, n° 1, p. 2-12.
- Roediger III Henry L. & Butler Andrew C. (2011). « The critical role of retrieval practice in long-term retention ». *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 15, n° 1, janvier, p. 20-27.
- Sakai Kuniyoshi L. (2005). « Language acquisition and brain development ». *Science*, vol. 310, n° 5749, avril, p. 815-819.
- Schrag Francis (2011). « Does neuroscience matter for education? ». *Educational Theory*, vol. 61, n° 2, p. 221-237.
- Schrag Francis (2013). « Can this marriage be saved? The future of "Neuro-Education" ». *Journal of Philosophy of Education*, vol. 47, n° 1, p. 20-30.
- Shaywitz Sally E., Morris Robin & Shaywitz Bennett A. (2008). « The education of dyslexic children from childhood to young adulthood ». *Annual Review of Psychology*, vol. 59, n° 1, p. 451-475.
- Skolnick Weisberg Deena, Keil Franck C., Goodstein Joshua *et al.* (2008). « The seductive allure of neuroscience explanations ». *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 20, n° 3, mars, p. 470-477.
- Sousa David A. (2002). *Un cerveau pour apprendre : Comment rendre le processus enseignement-apprentissage plus efficace*. Montréal : Chenelière Education.

- Sousa David A. (dir.) (2010). *Mind, brain, and education: Neuroscience implications for the classroom*. Bloomington : Solution Tree Press.
- Squire Larry R. (2004). « Memory systems of the brain: A brief history and current perspective ». *Neurobiology of Learning and Memory*, vol. 82, n° 3, novembre, p. 171-177.
- Stein Zachary, Della Chiesa Bruno, Hinton Christina & Fischer Kurt W. (2011). *Ethical issues in educational neuroscience: Raising children in a brave new world*. New-York : Oxford University Press.
- Stern Elsbeth (2005). « Pedagogy meets neuroscience ». *Science*, vol. 310, n° 5749, novembre, p. 745-745.
- Stewart Lauren & Williamon Aaron (2008). « What are the implications of neuroscience for musical education? ». *Educational Research*, vol. 50, n° 2, juin, p. 177-186.
- Stewart Lauren, Henson Rik, Kampe Knut *et al.* (2003). « Brain changes after learning to read and play music ». *NeuroImage*, vol. 20, n° 1, p. 71-83.
- Szwed Marcin, Vinckier Fabien, Cohen Laurent & Dehaene Stanislas (2012). « Towards a universal neurobiological architecture for learning to read ». *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 35, n° 5, p. 308-309.
- Tardif Éric & Doudin Pierre-André (2011). « Neurosciences cognitives et éducation : le début d'une collaboration ». *Formation et pratiques d'enseignement en questions*, n° 12, p. 95-116.
- Thierry Guillaume, Giraud Anne-Lise & Price Cathy (2003). « Hemispheric dissociation in access to the human semantic system ». *Neuron*, vol. 38, n° 3, mai, p. 499-506.
- Tiberghien Guy (dir.) (2002). *Dictionnaire des sciences cognitives*. Paris : Armand Colin.
- Tiberghien Guy (2007). « Entre neurosciences et neurophilosophie : la psychologie cognitive et les sciences cognitives ». *Psychologie française*, vol. 52, n° 3, septembre, p. 279-297.
- Treagust David F. & Duit Reinders (2009). « Multiple perspectives of conceptual change in science and the challenges ahead ». *Journal of Science and Mathematics Education in Southeast Asia*, vol. 32, n° 2, p. 89-104.
- Trout J. D. (2008). « Seduction without cause: Uncovering explanatory neurophilia ». *Trends in cognitive sciences*, vol. 12, n° 8, août, p. 281-282.
- Turner David A. (2011). « Which part of "two way street" did you not understand? Redressing the balance of neuroscience and education ». *Educational Research Review*, vol. 6, n° 3, p. 223-231.
- Vaivre-Douret L. (2007). « Troubles d'apprentissage non verbal : les dyspraxies développementales ». *Archives de Pédiatrie*, vol. 14, n° 11, novembre, p. 1341-1349.
- Van der Linden Martial (2003). « Une approche cognitive du fonctionnement de la mémoire épisodique et de la mémoire autobiographique ». *Cliniques méditerranéennes*, n° 67, mars, p. 53-66.
- Varela Francisco J. (1997). *Invitation aux sciences cognitives*. Paris : Éd. du Seuil.
- Varma Sashank & Schwartz Daniel L. (2008). « How should educational neuroscience conceptualise the relation between cognition and brain function? Mathematical reasoning as a network process ». *Educational Research*, vol. 50, n° 2, p. 149-161.
- Vidal Catherine (2011). « Le cerveau a-t-il un sexe ? ». In Dugnat Michel, *Féminin, masculin, bébé*. Toulouse : Érès, p. 55-66.
- Virole Benoît (2010). « Trois interrogations cliniques sur la légitimité du concept de dysphasie ». *Enfance et psy*, vol. n° 47, n° 2, juin, p. 89-94.
- Vul Edward, Harris Christine, Winkielman Piotr & Pashler Harold (2009). « Puzzlingly high correlations in fMRI studies of emotion, personality, and social cognition ». *Perspectives on Psychological Science*, vol. 4, n° 3, mai, p. 274-290.
- Walsh Vincent & Pascual-Leone Alvaro (2003). *Transcranial magnetic stimulation: A neurochronometrics of mind*. Londres : The MIT Press.
- Wilson Anna J. (2005). « Dyscalculie développementale : l'approche neurocognitive ». *Annales de la Fondation Fyssen*, n° 20, p. 28-37.
- Winter Bernard, Breitenstein Caterina, Mooren Frank C. *et al.* (2007). « High impact running improves learning ». *Neurobiology of Learning and Memory*, vol. 87, n° 4, mai, p. 597-609.
- Woollven Marianne (2011). « Enseigner la lecture et soigner ses troubles. L'intervention publique en matière de dyslexie en France et au Royaume-Uni ». *Revue internationale de politique comparée*, vol. 18, n° 4, février, p. 47-59.
- Ziegler Johannes C. & Goswami Usha (2005). « Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: A psycholinguistic grain size theory ». *Psychological Bulletin*, vol. 131, n° 1, p. 3-29.

Notes

Notes

Pour citer ce dossier :

Gaussel Marie & Reverdy Catherine (2013). *Neurosciences et éducation : la bataille des cerveaux*. Dossier d'actualité Veille et Analyses IFÉ, n° 86, septembre. Lyon : ENS de Lyon.

En ligne : http://ife.ens-lyon.fr/vst/DA/detailsDossier.php?parent=accueil&dossier=86&lang=fr

Retrouvez les derniers Dossiers d'actualité :

- Feyfant Annie (2013). *Quels contenus pour l'enseignement obligatoire ?* Dossier d'actualité Veille et Analyses IFÉ, n° 85, juin. Lyon : ENS de Lyon.

  En ligne : http://ife.ens-lyon.fr/vst/DA/detailsDossier.php?parent=accueil&dossier=85&lang=fr

- Thibert Rémi (2013). *Le décrochage scolaire : diversité des approches, diversité des dispositifs.* Dossier d'actualité Veille et Analyses IFÉ, n° 84, mai. Lyon : ENS de Lyon.

  En ligne : http://ife.ens-lyon.fr/vst/DA/detailsDossier.php?parent=accueil&dossier=84&lang=fr

- Rey Olivier (2013). *Décentralisation et politiques éducatives*. Dossier d'actualité Veille et Analyses IFÉ, n° 83, avril. Lyon : ENS de Lyon.

  En ligne : http://ife.ens-lyon.fr/vst/DA/detailsDossier.php?parent=accueil&dossier=83&lang=fr

Abonnez-vous aux Dossiers d'actualité :

http://ife.ens-lyon.fr/vst/abonnement.php

© École normale supérieure de Lyon
Institut français de l'Éducation
Agence Qualité Éducation – Veille et Analyses
15 parvis René-Descartes BP 7000 – 69342 Lyon cedex 07
veille.scientifique@ens-lyon.fr
Standard : +33 (04) 26 73 11 24
Télécopie : +33 (04) 26 73 11 45
ISSN 2266-5854