

# Initiation à la Neuroéducation

## Résumé

Les aspects théoriques et techniques de la Neuroéducation sont exposés simplement dans cet article ainsi que les bases anatomiques et neurophysiologiques nécessaires à sa compréhension. L'historique des méthodes d'exploration du fonctionnement cérébral est abordée avant d'évoquer les moyens modernes d'investigation et de recherche : électroencéphalographie, potentiels évoqués, scanner, tomographie à émission de positons, imagerie cérébrale fonctionnelle.

L'auteur insiste sur les «neurones miroirs», révélés par Giacomo Rizzolatti, sur les «neurones de la lecture», décrits par Stanislas Dehaene et sur la «plasticité cérébrale», découvertes capitales qui ont profondément modifié depuis quelques années notre compréhension de l'activité du cerveau. Après avoir traité du «recyclage neuronal» et de la «migration neuronale» (Stanislas Dehaene), Il envisage l'enseignement et l'apprentissage de la lecture et de l'écriture à titre d'exemple de Neuroéducation.

L'écriture est une invention humaine née en Mésopotamie il y a seulement 5000 ans. Or, si l'évolution a doté notre cerveau de centres innés du langage, l'écriture, infiniment plus récente dans notre histoire, nous oblige à solliciter des neurones qui sont naturellement dévolus à d'autres tâches, telles que la vision ou la reconnaissance des visages.

Des exemples pratiques pour l'enseignement et l'apprentissage de l'écriture et de la lecture sont enfin exposés.

oooooooooooooooo

Le propos de cette communication est de détailler les principes de la Neuroéducation. Le rappel de quelques rudiments d'anatomie et de neurophysiologie du cerveau et des méthodes d'exploration de l'activité cérébrale devrait nous faciliter la compréhension de cette présentation. Ces sujets sont parfaitement abordables en termes simples ; il sera question de machines extraordinaires, de plasticité cérébrale, de recyclage et de migration neuronale, de neurones miroirs et de neurones de la lecture. Pour terminer, l'auteur traitera, à titre d'exemple, l'apport de la Neuroéducation à l'apprentissage de la lecture et de l'écriture.

Les enseignants se réfèrent souvent à leur intuition pour améliorer et adapter au mieux leurs pratiques, dont beaucoup sont d'ailleurs pertinentes grâce à un empirisme millénaire bien antérieur à Platon ou Aristote.

Les neurosciences ont progressé de manière fulgurante ces dernières années grâce à l'Imagerie Cérébrale Fonctionnelle (**ICF**) qui associe la Tomographie par Émission de Positons (**TEP**) et l'Imagerie par Résonance Magnétique Fonctionnelle (**IRMf**) à des méthodes plus anciennes tels que les Potentiels Évoqués (**PE**) et l'électroencéphalographie (**EEG**). Lorsque notre cerveau pense, réfléchit, parle, enseigne ou apprend, ces technologies permettent de visualiser et de mieux comprendre le fonctionnement de ses 100 milliards de neurones et de leurs millions de milliards de connexions.

Cette explosion de moyens techniques a révolutionné l'approche des sciences cognitives qui sont d'ailleurs difficiles à définir car, outre les neurosciences, elles recourent à une multitude de domaines tels que la psychologie, la linguistique, l'anthropologie... Elles explorent les mécanismes de la pensée et de la connaissance, plus particulièrement les «fonctions dites supérieures», spécifiques à l'homme, comme la conscience de soi, le raisonnement, l'attention, le calcul, le langage... Ce dernier, dont la valeur socio-culturelle est immense, symbolise d'ailleurs l'unité de l'espèce humaine et nous différencie de nos lointains ancêtres.

Le but de la Neuroéducation est de confronter aux mécanismes intimes du fonctionnement cérébral nos méthodologies d'enseignement. Il semble logique que celles d'entre elles qui activent nos circuits cérébraux et s'harmonisent avec eux soient plus performantes que celles qui sont absolument incompatibles avec l'activité naturelle de nos neurones, dont l'archétype est la méthode globale.

Didacticiens et neurophysiologistes collaborent et ambitionnent ainsi d'optimiser, voire de renouveler, nos méthodologies d'enseignement dans des disciplines aussi variées que l'apprentissage de la lecture, de l'écriture, des mathématiques, des sciences ou des langues étrangères. Il est navrant, en effet, pour prendre un exemple, de rencontrer des étudiants incapables de s'exprimer correctement en anglais ou en espagnol mais capables de traduire Shakespeare ou Cervantes.

La Neuroéducation et la Neurodidactique ne sont pas des catalogues de recettes mais apportent des données scientifiques dûment établies et validées. Les enseignants y trouvent matière à réflexion et de précieux moyens d'améliorer leur pratique tout en restant maîtres de leur art et de leur liberté académique. La Neurodidactique est la branche de la Neuroéducation qui traite des méthodologies d'enseignement dans les différents domaines de l'éducation.

Bernard Charlot, philosophe et spécialiste en sciences de l'éducation, ne déclare-t-il pas lors de son discours inaugural en 2012 à Reims, alors qu'il préside le XVII<sup>ème</sup> Congrès Mondial des Sciences de l'Éducation : «La médecine et l'enseignement sont des arts mais nul ne pardonnerait à son médecin de ne pas être au courant des tous derniers progrès des sciences. Il devrait en être de même pour les enseignant» ?

Ce besoin d'améliorer l'enseignement par les sciences n'est pas nouveau et Julien Mercier (UQAM, Montréal) rappelle qu'en 1895 déjà un certain Donaldson, neurologue, évoquait la relation entre le système nerveux et l'éducation. L'OCDE, a publié en 2002 un ouvrage très documenté intitulé "Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage" (10), qui n'a eu aucun écho.

La démarche est logique mais suscite parfois incompréhension, méfiance et réticences. La Neuroéducation ne cherche pourtant pas à agir sur le cerveau par des moyens chimiques, physiques ou psychologiques comme certains le craignent. Cette peur n'est cependant pas totalement infondée puisque d'aucuns prétendent améliorer l'apprentissage des mathématiques par la stimulation magnétique transcrânienne. Il est vrai aussi que la neuroimagerie est à la mode et que des termes que nous pourrions qualifier de «neuro quelque chose», envahissent les médias. Les publications scientifiques sont elles-mêmes gagnées par l'euphorie des neurosciences et les sujets abordés sont parfois d'une pertinence douteuse ou traités de manière approximative. Un comité d'éthique spécifique à la Neuroéducation nous semble donc opportun.

La Neuroéducation, enfin, s'intéresse aux gauchers, à la dysorthographe et à la dyslexie mais n'entre pas dans le champ de pathologies neurologiques ou psychiatriques tel que l'autisme.

Jean-Pierre Changeux, neurobiologiste, de l'Institut Pasteur et du Collège de France, auteur de «L'homme neuronal», écrit en préface au livre «Les neurones de la lecture» (5), de Stanislas Dehaene, auquel nous ferons souvent référence :

*Sans doute à cause du dualisme platonicien, la tradition occidentale - que je n'hésiterai pas à qualifier de tragique - a établi un clivage entre les sciences de l'homme et les sciences biologiques. Au point que l'on s'est longtemps accordé pour opposer le biologique au culturel, la nature à la culture, les gènes à l'apprentissage. Un des points forts des neurosciences contemporaines est d'avoir démontré que, chez l'homme, le culturel ne peut se penser sans le biologique et que le*

*cérébral n'existe pas sans une puissante imprégnation de l'environnement. La césure platonicienne entre le cerveau et l'esprit s'abolit au bénéfice de la construction d'une architecture cérébrale commune, source d'un immense univers combinatoire entre les gènes et l'environnement. En outre, un des traits les plus frappants du cerveau de l'homme est que, dès les premières étapes de son développement, et déjà dans le sein maternel, son organisation fonctionnelle fait preuve d'une exceptionnelle plasticité qui lpermettra d'acquérir l'écriture (Dehaene, S. (2007). Les neurones de la lecture. (pp.13-14). Paris : Odile Jacob).*

L'écriture est une invention humaine née en Mésopotamie à l'époque de Sumer, il y a 5000 ans, alors que le langage oral, qui dériverait de la gestuelle, serait infiniment plus ancien. Le premier alphabet cohérent connu, qui remonte à 1400 ans avant notre ère, a été découvert à Ougarit, en Syrie. Les archéologues et les anthropologues hésitent cependant dans leurs évaluations. Certains évoquent une naissance du langage oral il y a 2 millions d'années avec Homo habilis, bien après la brutale et inexplicquée augmentation de volume du cerveau humain (3,5 millions d'années) et l'apparition de la bipédie (7 millions d'années). D'autres plaident pour une apparition plus récente, entre 80000 et 160000 ans. Le linguiste Noam Chomsky, provocateur, parle même de l'apparition soudaine à la même époque d'un centre cérébral universel de la grammaire (3, 4). Quoi qu'il en soit, le langage oral est suffisamment ancien pour que l'évolution ait doté notre cerveau de centres innés du langage, alors que l'écriture, très récente à l'échelle de notre histoire, ne peut s'exprimer que par un difficile apprentissage qui sollicite des neurones normalement dévolus par la nature à d'autres tâches.

Le langage oral ne pouvait aussi apparaître que grâce à certaines propriétés du larynx humain qui s'est profondément modifié lors du passage de l'homme à la bipédie. Avec la station verticale, en effet, la position de la tête, plus droite, a entraîné une descente du larynx vers le bas. Associé au pharynx et à la cavité buccale, il constitue une caisse de résonance propice à l'émission des sons.

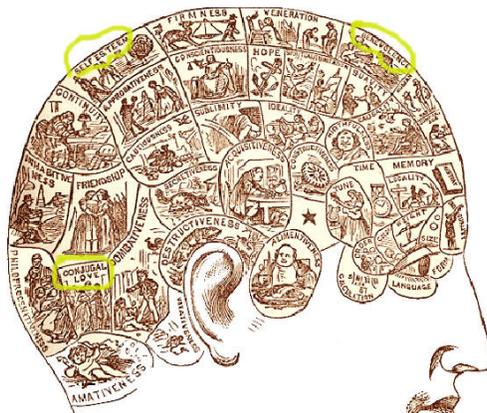
Il n'est pas certain que l'augmentation de volume du cerveau, en particulier au niveau du cortex préfrontal, ait seule conditionné l'amélioration de nos fonctions cognitives. Nous verrons que des centres corticaux de plus en plus spécialisés et fonctionnels sont réunis par des réseaux de neurones de plus en plus denses et complexes qui communiquent entre eux par des contacts

électriques ou chimiques appelés synapses. Ces dernières fonctionnent grâce à plus d'une centaine de neurotransmetteurs, substances qui se fixent spécifiquement sur certaines cellules nerveuses comme une clé sur une serrure.

Nos connaissances sur le fonctionnement cérébral sont relativement récentes. Avant la découverte des méthodes modernes d'exploration du système nerveux, en effet, seuls l'examen clinique et les résultats d'autopsie de cas pathologiques pouvaient nous éclairer indirectement. L'électroencéphalogramme (**EEG**), premier examen fonctionnel disponible en neurologie, explore l'activité électrique spontanée du cerveau. Il fut découvert en 1922 par Hans Berger mais ne put être utilisé couramment qu'en 1950. Le Scanner ou Tomodensitométrie est arrivé en France dans les années 75, la Résonance Magnétique et la Tomographie par Émission de Positons en 1990 et la Résonance Magnétique Fonctionnelle en 1995.

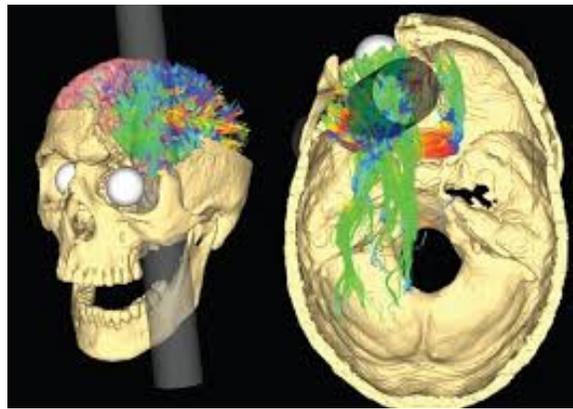
Ces machines très sophistiquées et très coûteuses ne sont aisément disponibles que depuis 15 ou 20 ans, ce qui explique l'explosion récente des recherches en neurologie et en neurophysiologie.

Franz Joseph Gall (1758-1828), inventeur de la «cranoscopie» (fig. 1) et de la «phrénologie», prétendait déterminer les fonctions mentales et les sentiments par l'examen des bosses du crâne, reflets des 27 «organes» de notre cerveau. Chacun d'eux correspondait à une fonction (mathématiques, intelligence, fierté, religion, hypocrisie, etc.). Malgré l'absence de toute validité scientifique, cette théorie fit fureur à l'époque et préfigura les neurosciences modernes et la neuroimagerie cérébrale fonctionnelle.



**Figure 1.** Cranoscopie (Frantz Joseph Gall).

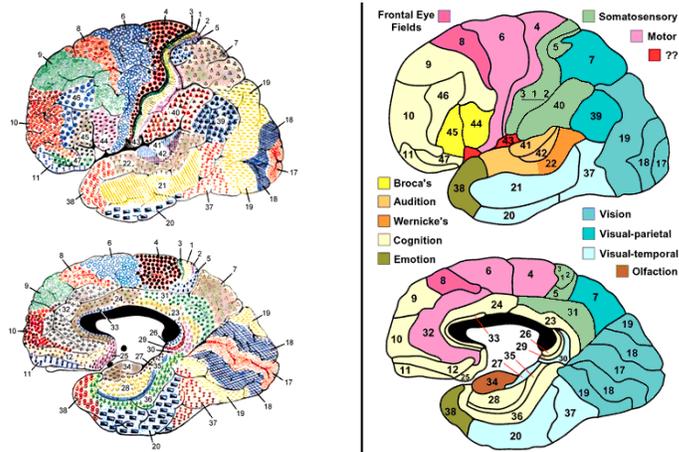
En 1848, Phineas Gage (fig.2) qui travaillait comme contremaître à la construction d'une ligne de chemin de fer dans le Vermont, aux USA, fut victime d'un accident dramatique, une barre à mine lui ayant traversé la tête dans la région frontale. Il survécut mais, s'il conserva des facultés intellectuelles intactes, sa personnalité fut profondément perturbée : il devint grossier, caractériel et incapable de prévoir les conséquences de ses actes. Il s'agit du premier cas de «syndrome frontal» bien documenté. Phinéas est mort 12 ans plus tard d'une crise d'épilepsie. En 1994, les Américains Hanna et Antonio Damasio ont pu étudier son crâne, conservé à l'Université Harvard, et reconstituer, en 3D par ordinateur, les lésions frontales typiques du syndrome provoquées par la blessure.



**Figure. 2** Blessure de Phineas Gage (A. et H. Damasio).

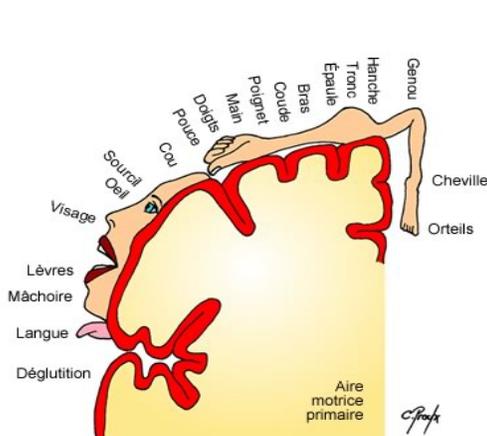
En 1860, Pierre Paul Broca décrit le centre du langage moteur à l'autopsie d'un certain M. Leborgne, atteint d'aphasie, décédé à l'Hôpital Kremlin-Bicêtre à Paris (1). Ce patient, qui jouissait de toute sa lucidité et comprenait, ou évoquait, parfaitement le sens des mots, ne pouvait plus les prononcer. Il souffrait d'une paralysie des muscles moteurs du langage secondaire à un accident vasculaire cérébral d'origine syphilitique localisé dans le lobe frontal gauche. Peu après, le neuropsychiatre allemand Karl Wernicke décrit le centre de l'aphasie sensitive localisé dans le lobe temporal du même côté (12). À l'inverse du malade de Broca, son patient pouvait parler mais ne prononçait que des paroles incohérentes car il avait perdu la notion du sens des mots.

En 1909, Korbinian Brodmann met en évidence 52 aires différentes au niveau du cortex cérébral par l'analyse de leur structure cellulaire (fig. 3)

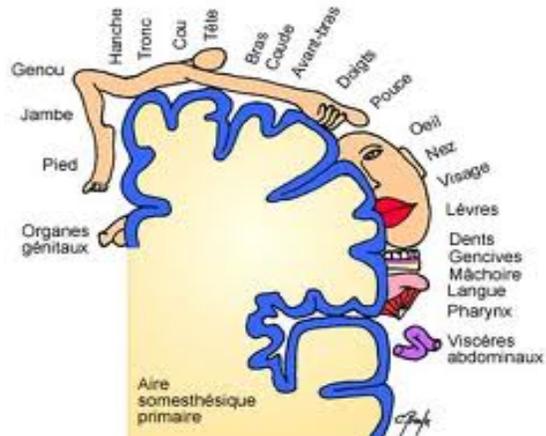


**Figure. 3** Aires de Korbinian Brodmann, Mark Dubin (Colorado University).

En 1950, Wilder Penfield et Theodore Rasmussen, Université McGill à Montréal, établissent une cartographie détaillée du cortex cérébral grâce à des stimulations électriques réalisées point par point au cours d'interventions neurochirurgicales. Ils dessinent ainsi l'«Homonculus moteur et sensitif» (fig. 4, 5) qui porte leur nom.



**Figure. 4** Homonculus moteur.



**Figure. 5** Homonculus sensitif.

L'électroencéphalographie (**EEG**), irremplaçable pour le diagnostic et le traitement des épilepsies, donne d'ineestimables renseignements dans l'étude de l'attention, de la vigilance et du sommeil. On enregistre, grâce à un maillage d'électrodes directement posées sur le cuir chevelu, l'activité électrique générée par le cerveau et la numérisation en fournit une

cartographie précise. C'est la première des explorations fonctionnelles et dynamiques de l'activité des neurones cérébraux.

Les potentiels évoqués (**PE**) dérivent de l'électroencéphalographie mais, si on enregistre toujours l'activité électrique du cerveau, les ondes captées ne sont plus spontanées comme précédemment : elles sont secondaires à une stimulation extérieure, qu'elle soit mentale, auditive, visuelle ou autre. On étudie surtout l'onde **P. 300** qui survient lorsqu'un sujet est stimulé. Elle représente une modification de l'activation des réseaux neuronaux en relation avec une opération cognitive. L'onde **P. 300** donne une indication sur la durée et l'aspect énergétique des opérations cognitives.

L'**EEG** et les **PE** ont moins de valeur localisatrice que l'imagerie fonctionnelle mais donnent une réponse presque instantanée, ce qui n'est pas le cas de l'**ICf** dont la réactivité est plus lente. L'association des deux techniques est donc complémentaire.

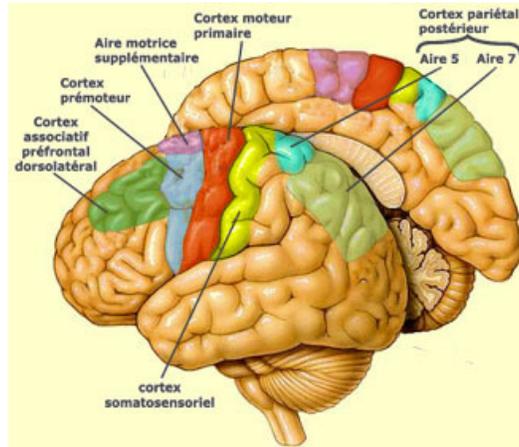
Entre 1950 et 1970, Jean Talairach, Jean Bancaud et Stéphane Geier, Hôpital Sainte-Anne à Paris, deviennent les pionniers au niveau mondial de l'exploration profonde du cerveau par des électrodes d'électroencéphalographie très fines directement implantées au coeur du tissu cérébral.

Les neurologues possédaient donc une bonne connaissance de l'anatomie et de la neurophysiologie du cerveau bien avant la découverte du scanner, de l'IRM et de l'Imagerie Fonctionnelle. Ces derniers ont cependant permis une compréhension de plus en plus fine de l'activité cérébrale.

### **Quelques rappels d'anatomie et de neurophysiologie du cerveau**

L'encéphale est constitué de deux hémisphères cérébraux grossièrement symétriques qui communiquent entre eux par un réseau associatif de neurones appelé le corps calleux (fig. 6). Les fonctions physiologiques des deux hémisphères sont différentes : chez le droitier, le gauche est bavard, logique et calculateur alors que le droit est poète, musicien et sentimental.

Lucien Israël (9) a pu même évoquer les différences culturelles qui séparent les sociétés occidentales et extrême-orientales en supposant qu'elles s'étaient développées différemment, les unes à partir du cerveau gauche et les autres à partir du droit.



**Figure 6.** Face interne et face externe du cerveau.  
(McGill, Montréal)

Les hémisphères cérébraux coiffent et enveloppent un cerveau ancien, ou «paléo-cerveau», légué par nos ancêtres animaux. Le paléo-cerveau est constitué du diencephale, du tronc cérébral, du thalamus, des noyaux gris centraux et du cervelet. Il contrôle les fonctions vitales automatiques inconscientes : respiration, digestion, fonctionnement cardiaque, thermorégulation, équilibre, etc. Grâce à ses riches connexions, il joue un rôle capital dans la transmission des informations, la modulation et la régulation des fonctions du cortex, même les plus subjectives, telles que l'humeur, la pensée, la vigilance ou l'attention, qui ne sont pas sans effet sur la qualité de l'apprentissage.

Le large sillon de Rolando sépare en deux dans le sens longitudinal les hémisphères cérébraux qui comportent, outre le cortex limbique, fortement impliqué dans les processus de mémorisation, quatre lobes principaux.

En avant, le lobe frontal planifie, initie et contrôle les mouvements et leur coordination ou praxies. Il joue un rôle majeur dans la conception de la pensée, dans l'activation et le déroulement de nos fonctions cognitives, dans l'évaluation des conséquences de nos actes et dans l'expression du langage.

En arrière, le lobe pariétal assure les sensibilités, les sensations, la perception de l'espace, l'évaluation des mouvements ou gnosies et le décodage du langage.

A son pôle postérieur, le lobe occipital héberge les centres de la vision.

En bas, sous la scissure de Sylvius, le lobe temporal est celui de certaines émotions, de l'audition, de l'élaboration et de la compréhension du langage.

Chaque hémisphère commande ou reçoit les informations du côté opposé du corps car le trajet des fibres nerveuses est croisé. 85% environ des individus sont droitiers et les zones motrices du langage sont situées dans l'hémisphère gauche, à proximité des centres moteurs dominants. Chez les gauchers, ces mêmes formations sont situées dans l'hémisphère droit, au moins partiellement.

Cent milliards de neurones sont ordonnés en plusieurs couches pour constituer la substance grise ou cortex organisé en circonvolutions (fig.10). Ils sont eux-mêmes protégés et nourris par plusieurs centaines de milliards de cellules gliales. Le neurone possède un axone afférent, unique, qui exporte et véhicule les informations sous forme de courants d'action et plusieurs milliers de dendrites efférents qui sont des récepteurs. Un seul neurone peut assurer jusqu'à quarante mille contacts par l'intermédiaire de synapses électriques et chimiques. Axones et dendrites constituent ainsi un immense maillage de millions de milliards de connexions cellulaires. On imagine mal les innombrables interactions électriques et chimiques des diverses aires cérébrales entre elles d'où notre difficulté à en saisir le fonctionnement.

Au niveau du cortex siègent des centres moteurs, sensitifs, sensoriels ou fonctionnels. Chaque partie du corps, chaque fonction physiologique, telles que la vision ou la sensibilité, sont représentées par des zones qui lui correspondent en propre et assurent son fonctionnement. Le cortex moteur et le cortex sensitif reproduisent donc l'image du corps selon une topographie précise dessinant l'Homunculus moteur ou sensitif (fig. 4, 5).

Le scanner (**CT. scan**), fournit une image détaillée de l'anatomie du cerveau et permet de bien visualiser la forme et la composition de ses diverses structures. Son principe dérive de l'absorption variable des rayons **X** selon la nature et la densité des tissus traversés. Or la structure du cerveau est hétérogène : substance grise des neurones, substance blanche des fibres nerveuses, névroglie, artères, veines, ventricules...

Une couronne de détecteurs enregistre les valeurs du rayonnement plan par plan et point par point. Ces données sont traitées par ordinateur et fournissent des images précises du cerveau, en trois dimensions si nécessaire.

L'Imagerie par Résonance Magnétique Nucléaire (**IRM**) repose sur un principe différent. Le patient est placé dans un champ magnétique très puissant. Les noyaux des molécules d'hydrogène (protons) de l'eau, qui

constitue 80% de la masse du cerveau, s'orientent alors tous dans le même sens et sont soumis à un champ de radiofréquence. Les signaux captés permettent ensuite, grâce à l'informatique, de reconstruire une image dans les trois plans de l'espace. L'IRM est plus précise que le scanner et fournit de superbes images très détaillées, mais statiques.

Au contraire des méthodes précédentes, dont elle est pourtant directement dérivée, l'imagerie cérébrale fonctionnelle (**ICf**) est dynamique. Elle représente par rapport à l'imagerie standard ce que le cinéma est à la photo. Elle utilise pour l'étude des fonctions cognitives la tomographie à émission de positons (**TEP scan**) et l'IRM fonctionnelle ou **IRMf**. Dans les deux cas, on mesure le flux sanguin et ses variations dans les zones actives de l'encéphale. Lorsqu'un groupe de cellules fonctionne, en effet, sa consommation d'énergie augmente, d'où accroissement du débit sanguin.

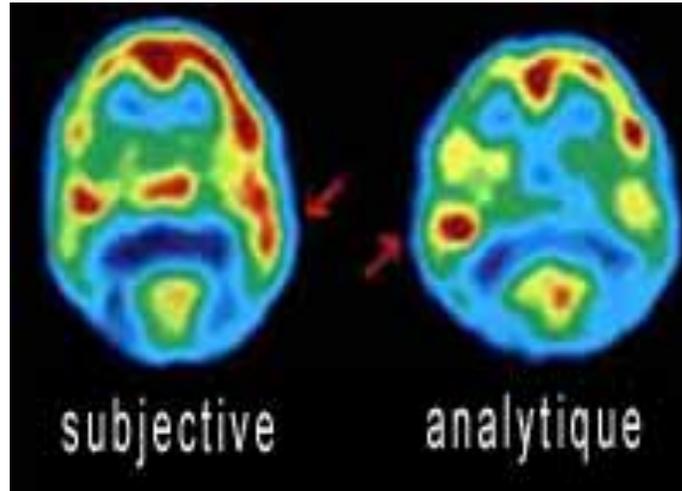
**TEP** et **IRMf** donnent sensiblement les mêmes résultats. L'une ou l'autre est utilisée en fonction de l'équipement des différents laboratoires de recherche et du type d'expérience réalisée. On obtient une série d'images qui matérialise le fonctionnement cérébral en fonction de la tâche effectuée : raisonnement, attention, lecture, calcul... (fig. 13, 14, 15).

Dans la **TEP**, un marqueur radioactif injecté dans le sang émet des positons. Des caméras spéciales évaluent l'intensité du rayonnement. Celui-ci est proportionnel au débit sanguin dans le groupe cellulaire considéré.

L'**IRMf**, d'utilisation plus commode a cependant tendance à s'imposer. Elle ne nécessite pas de produit radioactif, en effet, ce qui simplifie les manipulations techniques et réduit les coûts d'utilisation. On enregistre les variations du flux sanguin en fonction des propriétés magnétiques de l'hémoglobine. On appelle *effet BOLD* cette variation locale de susceptibilité magnétique par variation de concentration en désoxyhémoglobine.

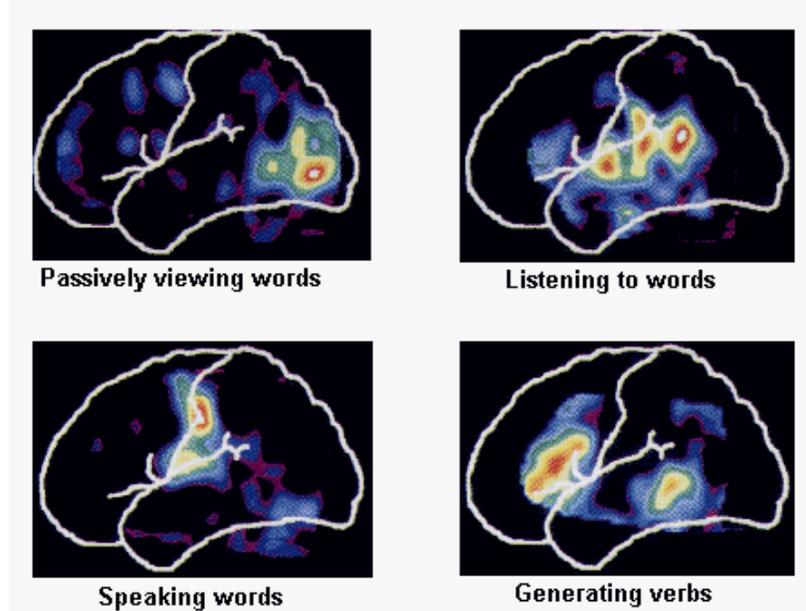
Les résultats sont étonnants :

- Un chef d'orchestre écoutant de la musique pour son plaisir active intensément son cerveau droit alors qu'il stimule au contraire le gauche lorsqu'il réfléchit à l'orchestration de l'œuvre pendant l'écoute (fig. 7).



**Figure 7.** TEP du chef d'orchestre.(McGill. Montréal)

- De même, lors de l'étude des diverses phases du langage oral, les centres cérébraux mis en jeu sont parfaitement identifiés (fig.8).



**Figure 8.** TEP Centres du langage.

Images du haut, de gauche à droite : mots vus, mots entendus.  
Images du bas, de gauche à droite : mots prononcés, génération de mots.  
(McGill. Montréal)

- Le recyclage neuronal provoqué par l'apprentissage de la lecture, enfin, est manifeste (fig.9).

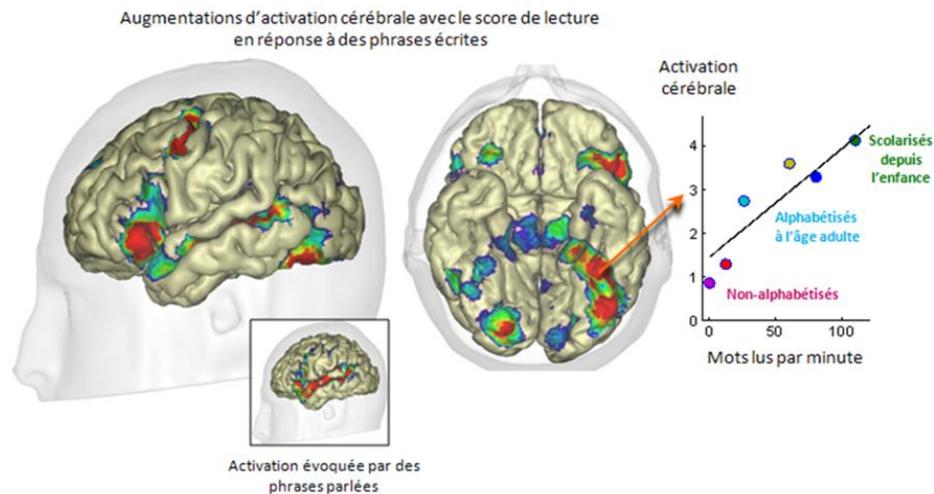


Figure : un aperçu des vastes réseaux cérébraux dont l'activité augmente avec le score de lecture, en réponse à des phrases écrites. Dès qu'une personne sait lire, la réponse aux mots écrits augmente rapidement dans diverses aires visuelles, dont l'une est spécialisée dans l'analyse de la forme des lettres (graphe de droite). De plus, l'ensemble des régions de l'hémisphère gauche impliquées dans le traitement du langage parlé (médaillon) devient susceptible de s'activer également en réponse au langage écrit.  
Crédit : CEA

### Figure 9. Activité cérébrale et lecture (CEA, Saclay).

L'IRM de diffusion mesure, elle, la mobilité des molécules d'eau et permet de matérialiser les faisceaux de neurones associatifs qui relient les centres nerveux entre eux et constituent la substance blanche.

Ces nouvelles machines nous éclairent aisément et très précisément sur le fonctionnement intime du cerveau. Il ne s'agit pas du travail de quelques apprentis sorciers mais de puissants laboratoires dotés de budgets conséquents. Le «Human Brain Project» (HBP), développé par l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne regroupe 150 Instituts Scientifiques de 24 pays européens, dont Neurospin (France), et dispose d'un budget de 10 milliards d'euros sur 10 ans. Modéliser le cerveau humain et créer les moyens techniques nécessaires pour y parvenir : tel est l'objectif, impliquant spécialistes des neurosciences, médecins, physiciens, mathématiciens, informaticiens et éthiciens. «Ce projet constitue une étape décisive dans la compréhension du cerveau humain» (2).

Neurospin, dirigé par le Dr Denis Le Bihan, utilise l'appareil d'IRMf le plus

puissant du monde et participe naturellement au Human Brain Project. Stanislas Dehaene, professeur de Psychologie Cognitive Expérimentale au Collège de France y mène la majorité de ses recherches, en particulier sur l'apprentissage de l'écriture et de la lecture.

Le Président Barack Obama vient d'impulser un programme comparable aux USA, avec un budget équivalent, baptisé **Brain Initiative** (*Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies*), dont les buts sont complémentaires avec ceux du *Human Brain Project*.

Avant d'envisager l'apprentissage de la lecture du point de vue neurophysiologique, il est nécessaire de rappeler encore quelques points importants pour sa compréhension, en particulier la découverte de la plasticité cérébrale, du recyclage neuronal, des neurones miroirs, et des neurones de la lecture.

*Le langage gestuel, de caractère primitif mais universel, ne s'est pas effacé avec l'apparition du langage conventionnel vocal ou graphique : il le complète, ajoute à sa signification et le renforce. L'avocat qui plaide avec éloquence ne se contente pas du langage verbal : il y associe force gestes et, s'il est droitier, c'est ce côté du corps qu'il actionne de préférence. Il est donc naturel que les centres du langage se localisent dans le cerveau gauche, près des centres moteurs activant le côté droit du corps. (Delmas Marsalet, P. (1968). Précis de Neurologie (p.553).Paris : Maloine.*

et

*La parole est le moyen de communication prévalant dans l'espèce humaine. Les phonèmes en sont les composants essentiels. Ces éléments sonores s'enchaînent dans un ordre donné et forment des morphèmes, ou unités linguistiques minimales ayant un sens et dont les combinaisons variables donnent les mots. Leur arrangement dans les phrases obéit à des règles syntaxiques précises qui varient en fonction des langues, la grammaire constituant un modèle de combinaison propre à chacune d'entre elles. (De Recondo, J. (1995). Sémiologie du système nerveux (p.178).Paris : Flammarion.*

Le langage est une fonction de communication sophistiquée qui fait appel à des symboles. Les signes utilisés peuvent être vocaux (langage oral), visuels (écriture), visuospatiaux (langage des malentendants), tactiles (système Braille). Le langage intérieur, sans production extérieure détectable, est

intimement lié à la pensée. Inversement, il semble que celle-ci puisse exister sans langage comme le suggère l'**ICf**.

Merritt Ruhlen, linguiste lui aussi, a étudié la répartition des racines des mots essentiels dans les diverses langues (12). Il en conclut qu'il y a cinquante mille ans, nos ancêtres africains possédaient un «proto-langage» dont aurait dérivé la multitude des langues de la terre. Très critiquée, cette thèse semble cependant confortée par les données récentes de la génétique et de l'anthropologie.

Les sons procèdent des vibrations des cordes vocales lors de l'expiration. Le larynx, le pharynx, la cavité buccale, la langue et les lèvres constituent l'appareil phonatoire richement innervé par les derniers nerfs crâniens et très largement représenté sur l'«Homonculus moteur».

Les centres corticaux du langage sont regroupés dans des zones spécifiques autour de la scissure de Sylvius. L'aire de Broca, responsable de l'extériorisation du langage moteur, réside dans la région inférieure du lobe frontal. Sa lésion entraîne une aphasie qui ne porte que sur l'expression du langage. Son élaboration et sa compréhension, impliquent, par contre, l'aire de Wernicke, située dans la région temporale et le gyrus supra marginalis. Leur lésion provoque différents types d'aphasie sensitive sans troubles moteurs associés. Les centres du langage sont étroitement contigus et interconnectés avec ceux de la mimique et de la gestuelle.

Le rôle des aires visuelles et auditives est, enfin, indispensable, mais n'est pas suffisant. Notre cerveau doit aussi décoder grâce à des aires cérébrales spécifiques le sens et la signification des perceptions visuelles et des sons qu'il a perçus (fig. 17). Des recherches récentes en **IRMf** montrent que le fœtus âgé de 6 mois possède déjà, bien avant sa naissance, les centres nerveux nécessaires au langage, centres qui sont aussi développés et performants que ceux d'un adulte. Il réagit à la voix de sa mère et à certains mots in utero comme le prématuré du même âge.

La plasticité cérébrale est une découverte majeure de l'**ICF**. Le cerveau n'est pas un banal disque dur sur lequel on grave des informations de manière irrémédiable. Il est au contraire malléable et s'enrichit, se modifie, s'adapte en fonction des circonstances, de l'environnement, de l'apprentissage, des maladies ou des blessures. Les circuits corticaux qui assurent les fonctions motrices, sensibles ou subjectives s'étoffent lors de la répétition ou de l'apprentissage. De nouvelles connexions neuronales s'organisent, de jeunes neurones apparaissent ou les fonctions de certains d'entre eux changent

radicalement. Stanislas Dehaene parle de *recyclage neuronal* pour ces cellules qui modifient leur activité lors de l'apprentissage et de *migration neuronale* pour celles qui quittent un centre fonctionnel pour un autre où leur activité sera différente (2). La plasticité cérébrale persiste toute la vie même si elle diminue après l'âge de 10 ou 12 ans, alors que la maturité cérébrale n'est acquise qu'autour de la vingtième année. À condition d'être stimulé, le cerveau se modifie et s'adapte sans cesse, à tout âge. On comprend mieux le rôle capital de l'éducation et de l'entraînement et la déperdition neuronale en quantité et en qualité en l'absence de stimulation.

Giacomo Rizzolatti, Corrado Sinigaglia et leurs collaborateurs (Faculté de Médecine de Parme, Italie) ont découvert les «neurones miroirs» (11) en 1996 dans les régions préfrontales du singe. Observer un geste ou une action complexe provoque dans le cerveau des activations de neurones identiques à celles qui auraient été initiées si nous avions nous-même fait les mêmes mouvements. Ces neurones miroirs émettent donc des potentiels d'action spécifiques lors de l'action mais aussi lors de son observation chez autrui, et même lors de la simple évocation de cette même action. Ces neurones, qui ont été ensuite isolés et étudiés chez l'homme, sont très spécifiques, ne réagissant qu'à un style d'action ou à une seule personne et siègent dans de nombreuses régions fonctionnelles du cerveau. Certains ont pu ironiser au début des recherches sur le «neurone de la grand-mère». Les neurones miroirs interviennent activement dans la compréhension réciproque des actions et des intentions, dans les fonctions d'imitation, d'éducation et d'apprentissage. Leur rôle est capital dans les relations indissociables entre la bouche, la voix, la main, dans l'expression des émotions, de l'empathie ou de l'antipathie, dans le processus de l'attention. En pathologie, ces neurones semblent impliqués dans le déterminisme de l'autisme entraînant une désorganisation du langage et des troubles majeurs des relations sociales.

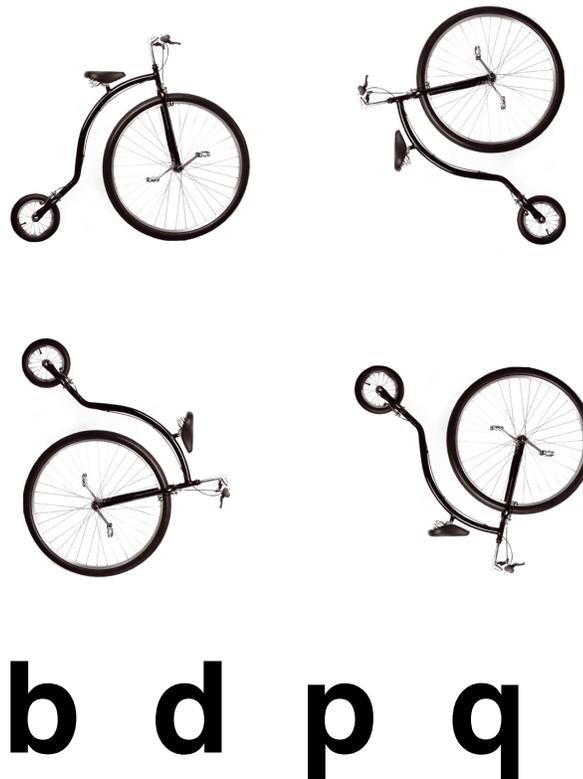
Peter Brook, célèbre dramaturge et metteur en scène britannique, a déclaré au sujet des neurones miroirs que les neurosciences commençaient à comprendre ce que le théâtre savait depuis toujours. Il pense que le travail de l'acteur n'aurait aucun sens si, par delà toute barrière linguistique ou culturelle, il ne pouvait partager les bruits et les mouvements de son propre corps avec les spectateurs en les faisant participer à un événement qu'ils doivent eux-mêmes contribuer à créer.

L'expression écrite, ou graphisme, a pris des formes très variables selon les époques et les civilisations. Des écritures aussi différentes que le chinois, l'arabe, le grec ou le latin le révèlent à l'évidence. Il est inutile pour s'en

convaincre d'évoquer l'écriture cunéiforme des Assyriens ou les hiéroglyphes des Egyptiens. Les caractères majuscules et minuscules, manuscrits ou typographiques, compliquent encore la tâche de l'apprenti lecteur. Champollion n'a pu déchiffrer les hiéroglyphes qu'après avoir compris qu'il s'agissait non seulement de pictogrammes ou d'idéogrammes, mais aussi de phonogrammes. Nous avons déjà évoqué le premier alphabet connu, celui d'Ougarit, en Syrie, qui remonte à 1400 ans avant notre ère. Il constitue le premier système graphique, relativement simple et cohérent, servant à transcrire les sons d'une langue.

Notre cerveau est programmé pour voir, sentir, s'orienter, parler. Le langage oral est assez ancien pour que l'évolution nous ait dotés de centres spécifiques. Nul ne sait d'ailleurs comment une fonction aussi compliquée a pu s'organiser spontanément ; un ami, spécialiste de l'évolution, dit que le cerveau humain est plus compliqué que la totalité de l'univers avec ses milliards de galaxies. Stanislas Dehaene a montré que l'acquisition de l'écriture exige un très difficile travail d'apprentissage pour lequel un certains nombres de nos cellules nerveuses se différencient en neurones de la lecture. Chez les lecteurs experts, comme ceux qui peuvent lire ce texte rapidement et sans difficulté, des milliards de neurones se sont différenciés et ont migré pour constituer un centre spécifique de la lecture dans l'hémisphère gauche. Il s'agit de nouvelles cellules nerveuses ou de neurones dont la fonction a changé. Ce sont des exemples typiques de recyclage neuronal et de migration neuronale. L'ICf montre bien l'apparition progressive de ce centre chez l'enfant qui apprend à lire (fig. 16). Certaines zones du cerveau dévolues à la reconnaissance des objets et des visages sont recyclées en aires de la lecture. L'adulte analphabète n'en possède naturellement pas mais, plus étonnant, en sera doté lui aussi petit à petit s'il s'initie à la lecture.

L'apprentissage de la lecture provoque de même la différenciation de cellules rétiniennes dévolues uniquement à la perception visuelle des lettres. Des circuits neuronaux spécifiques à la lecture apparaissent également entre la rétine et les zones cérébrales impliquées dans le *décodage* de la lecture. Notre cerveau de primate analphabète nous complique encore la vie car il est programmé, ce qui est logique, pour que nous reconnaissons un objet quelle que soit sa position dans l'espace. Or, si vous regardez les figures ci-dessous vous trouverez normal de voir 4 fois le même vélo quelle que soit son orientation (fig. 18). L'enfant qui apprend à lire ne sera peut-être pas tout à fait d'accord quand on cherchera à lui expliquer que la lettre **b** devient un **d**, un **p** ou un **q** selon son orientation spatiale (fig.10).



**Figure. 10**

On peut ainsi comprendre que certains enfants soient dyslexiques ou dysorthographiques, même si un facteur génétique constitue souvent l'une des causes de ces handicaps.

Ces découvertes sont parfaitement validées : il ne s'agit pas d'hypothèses mais de réalités, dont les applications peuvent être immédiates à l'école. Il est impossible de détailler ici les résultats obtenus par Stanislas Dehaene et ses collaborateurs lors de leurs fructueuses recherches sur les neurones de la lecture (6). Il nous semble primordial pour les enseignants du primaire de se référer à leur ouvrage «Apprendre à lire. Des sciences cognitives à la salle de classe» (5), véritable mine de renseignements, de conseils, de révélations insoupçonnées et très utiles. Ce livre contient même des Fiches de progression pédagogique à travers les difficultés de lecture du français établies par des spécialistes des neurosciences et des experts en apprentissage de la lecture. Les enseignants y puiseront beaucoup de suggestions pour optimiser leurs cours sans entraver leur indépendance. Les plus curieux pourront approfondir leurs connaissances sur le sujet avec «Les

Neurones de la Lecture» (6), ouvrage du même auteur mais plus détaillé et plus technique.

Ces auteurs insistent sur la nécessité impérieuse de s'en tenir à la méthode classique alphabétique et phonologique et de renoncer à la méthode globale, même édulcorée ; celle-ci imprègne encore trop souvent certains manuels scolaires et l'enseignement en salle de classe.

Voici à titre d'exemples quelques-unes de leurs constatations :

- ° L'apprentissage de la lecture demande au cerveau un effort considérable qui mobilise toutes les ressources mentales de l'enfant.
- ° Lire, c'est amener une connexion entre la vision des lettres et le codage des sons du langage. La vue s'affine.
- ° L'apprentissage de l'alphabet nécessite de focaliser l'attention de l'enfant sur les phonèmes.
- ° Les jeux du langage, qui font manipuler les syllabes, les rimes et les phonèmes, préparent efficacement l'enfant à la lecture.
- ° Pour apprendre à lire, l'enfant doit prêter attention à la présence des lettres et des suites de lettres qui correspondent aux phonèmes (les graphèmes) au sein des mots écrits.
- ° L'enseignement systématique des correspondances graphèmes-phonèmes accélère l'apprentissage.
- ° La confusion des lettres en miroir, comme **b** et **d**, est une propriété normale du système visuel du jeune enfant.
- ° Son désapprentissage demande des efforts
- ° La pratique du geste d'écriture accélère l'apprentissage de la lecture.
- ° L'automatisation de la lecture libère l'attention et la mémoire de travail.

La manipulation par l'enfant de lettres en métal ou en matière plastique est aussi très bénéfique et accélère beaucoup l'apprentissage. Elle ajoute une «perception tactile des sons», si l'on peut dire, aux perceptions visuelle et

auditive. Les enfants dysorthographiques et dyslexiques en tirent aussi bénéfice.

Au terme de cet exposé relatif aux principes de la *Neuroéducation* et à ses applications dans l'enseignement et l'apprentissage de l'écriture et de la lecture, nous voudrions insister sur leur implication dans d'autres disciplines. Les sciences, les mathématiques et l'enseignement des langues étrangères, pour lesquelles l'oral est une priorité absolue, sont concernées tout autant.

Les sciences cognitives s'intéressent aussi aux relations du langage avec les fonctions dites supérieures, telles que la conscience, la pensée, l'esprit, la personnalité comme nous l'avions évoqué avec Brigitte Vincent-Smith en 2012 dans un poster sur la neurodidactique des langues étrangères/secondes présenté au Congrès Mondial des Sciences de l'Éducation à Reims (17<sup>ème</sup> Congrès de l'AMSE-AMCE-WAER). L'importance des facteurs psychologiques et subjectifs nous ramène à la dichotomie qui existe entre nos deux hémisphères cérébraux, à ces processus inconscients qui gèrent nos pensées et nos apprentissages. La compréhension de leur mécanisme intime nous aiderait à déterminer quelles sont les meilleures méthodologies susceptibles de les activer ou, au contraire, de les neutraliser lorsqu'ils sont nocifs. Comment stimuler le pragmatisme du cerveau gauche, cartésien et calculateur, et évaluer la sensibilité du droit, subjectif et émotif ? Comment améliorer les fonctions positives et supprimer, a contrario, les blocages et les inhibitions ? On peut aussi envisager d'améliorer l'efficacité de l'apprentissage grâce au biofeedback qui diminue les tensions à l'aide de diverses techniques de relaxation.

La démarche de Julien Mercier (Neurolab, UQAM) qui porte ses recherches sur l'interaction enseignant/apprenant grâce à des techniques de pointe nous semble ouvrir un domaine très prometteur et pourrait réserver quelques surprises. Pourquoi l'enseignant ne tiendrait-il pas compte de son bilan neuropsychologique pour choisir les meilleures méthodologies ? Il pourrait concilier ainsi ses impératifs théoriques avec sa propre personnalité et celle de l'apprenant. Nous rejoignons ici, sous un angle différent, les recommandations du Cadre Européen Commun de Références pour les Langues sur les aptitudes de l'enseignant et les compétences de l'utilisateur/apprenant.

L'auteur espère, malgré l'apparente complexité de certaines de ces données, vous avoir convaincu de l'utilité et des possibilités de la *Neuroéducation* et de la *Neurodidactique*. Votre hémisphère droit saura, il en est sûr, vous

convaincre avec humour, décontraction et bonne humeur que le travail rigoureux et pénible de son voisin de gauche vous sera somme toute extrêmement bénéfique.

## 5. Références

1. Broca. P. (2004). *Ecrits sur l'aphasie (1861–1869)*. Paris : L'Harmattan.
2. Centre de l'Énergie Atomique. (Mai 2011). Saclay : Bulletin du CEA.
3. Chomsky, N. (1968). *Le Langage et la pensée*. Paris : Payot, coll. "Essais".
4. Chomski, N. (1975). *Réflexions sur le langage*. Paris : Champs, Flammarion.
5. Dehaene, S. (2007). *Les neurones de la lecture*. Paris : Odile Jacob.
6. Dehaene, S. (2011). *Apprendre à lire*. Paris : Odile Jacob.
7. Delmas-Marsalet P. (1968). *Précis de Neurologie*. Paris : Maloine.
8. De Recondo J. (1995). *Sémiologie du système nerveux*. Paris : Flammarion.
9. Israël, L. (1986). *Cerveau droit, cerveau gauche*. Paris : Plon.
10. OCDE. (2005). *Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage*. Cadre européen commun de référence pour les langues. Conseil de l'Europe. Paris : Les Editions Didier.
11. Rizzolatti, G., Sinigaglia, C. (2011). *Les neurones miroirs*, Paris : Odile Jacob.
12. Ruhlen M. (2007). *L'origine des langues*. Paris : Folio,
13. Wernicke K. (1874). *Der aphasische Symptomen complex*. Breslau