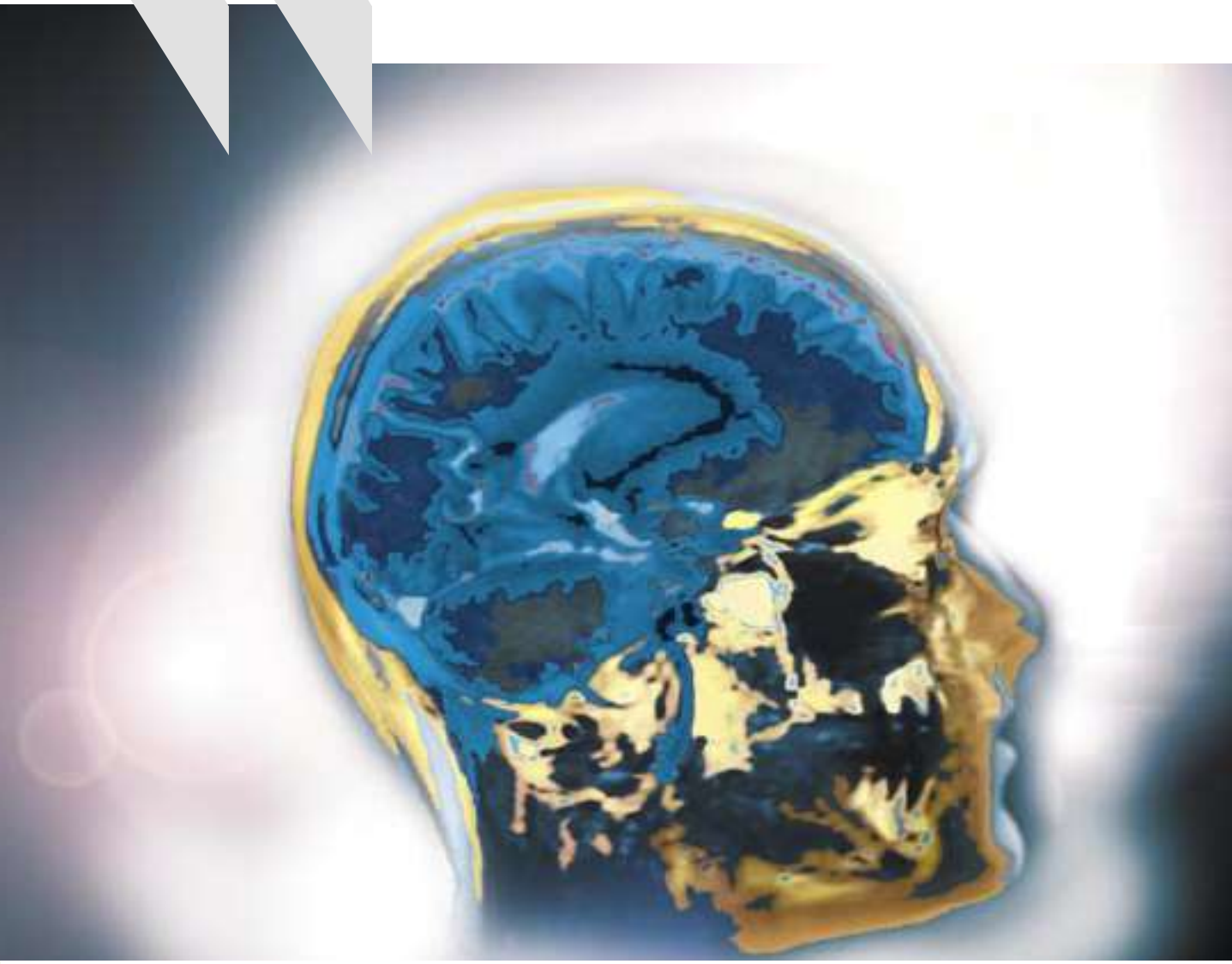
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage



OCDE

Centre for Educational Research and Innovation

CERI

Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement

Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement

Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage

OCDE

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements de 30 démocraties œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, la Corée, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues de l'OCDE ou des gouvernements de ses pays membres.

Publié en anglais sous le titre :
Understanding the Brain: The Birth of a Learning Science

© OCDE 2007

Toute reproduction, copie, transmission ou traduction de cette publication doit faire l'objet d'une autorisation écrite. Les demandes doivent être adressées aux Éditions OCDE *rights@oecd.org* ou par fax 33 1 45 24 99 30. Les demandes d'autorisation de photocopie partielle doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France, fax 33 1 46 34 67 19, *contact@cfcopies.com* ou (pour les États-Unis exclusivement) au Copyright Clearance Center (CCC), 222 Rosewood Drive Danvers, MA 01923, USA, fax 1 978 646 8600, *info@copyright.com*.

Avant-propos

Le projet du Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement (CERI) de l'OCDE intitulé « Sciences de l'apprentissage et recherche sur le cerveau » a été lancé en 1999. Le but premier de ce projet novateur était d'encourager la collaboration entre, d'une part, sciences de l'apprentissage et recherche sur le cerveau, et, de l'autre, chercheurs et décideurs politiques. Le Comité directeur du CERI a reconnu qu'il s'agissait là d'une tâche difficile, d'un véritable défi, mais dont les retombées positives étaient potentiellement très importantes. On a souligné en particulier que ce projet était des plus prometteurs pour ce qui est de la compréhension des processus d'apprentissage tout au long de la vie, et qu'il fournirait un cadre propice pour soulever nombre de questions éthiques de la plus haute importance. Ledit potentiel et lesdites interrogations ont fait encore davantage ressortir la nécessité d'un dialogue entre les différentes parties prenantes.

Dorénavant, la recherche sur le cerveau installe lentement mais sûrement ses applications dans le champ des apprentissages. Lors de sa seconde phase, le projet du CERI a réussi à initier une considérable fertilisation croisée entre domaines de recherche et entre chercheurs. Il a par ailleurs bénéficié d'une remarquable reconnaissance internationale, ce qui a conduit dans les pays de l'OCDE à l'émergence de nombreuses initiatives destinées à ancrer la connaissance du cerveau dans les pratiques éducatives. Toutefois, les découvertes neuroscientifiques exploitées par le secteur de l'éducation restent encore limitées à ce jour, en partie parce qu'il n'existe pas encore de consensus fort sur les applications potentielles de la recherche sur le cerveau aux politiques éducatives. Mais les raisons ne manquent pas pour encourager les centres pionniers situés au carrefour entre « cerveau et apprentissages » et pour promouvoir la création de passerelles supplémentaires entre les deux communautés de recherche. Les découvertes sur la plasticité du cerveau et sur la capacité de l'être humain à apprendre tout au long de la vie, ainsi que le développement de technologies toujours plus performantes (imagerie cérébrale permettant une exploration non invasive du cerveau) ouvrent la voie à des approches totalement inédites. En rapprochant encore les deux communautés, la probabilité de nouvelles découvertes à forte valeur ajoutée ne peut que croître.

Le présent ouvrage fait suite au rapport Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage *publié en 2002 par l'OCDE (et paru en sept langues; la plus grande part de cette première publication se retrouve dans le présent livre). Il a pour but d'informer le lecteur sur le cerveau, de l'aider à comprendre comment celui-ci apprend, et de montrer comment l'apprentissage peut être optimisé par la formation et par des pratiques d'enseignement adaptées. Le texte a été conçu pour être accessible aux non-spécialistes et s'efforce par conséquent d'éviter le jargon. Le contenu dérive en partie du travail effectué par les trois réseaux transdisciplinaires créés en 2002 pour traiter respectivement de littératie, de numératie et d'apprentissage tout au long de la vie, auxquels est venue s'ajouter en 2004 une quatrième activité, consacrée au rôle des émotions dans l'apprentissage. Le site Internet innovant dédié au projet a également servi de plateforme interactive pour recueillir les contributions de praticiens de l'éducation et, de manière générale, pour permettre à la société civile de prendre part aux débats.*

Dès le début, ce projet a reçu un soutien essentiel, en matière de contenu et de financement, de la part :

- *de la National Science Foundation (Direction de la recherche, de l'évaluation et de la communication/Division de l'éducation), États-Unis ;*
- *du ministère de l'Éducation, de la Culture, des Sports, de la Science et de la Technologie (MEXT), Japon ;*
- *du département pour l'Éducation et les Compétences (DfES), Royaume-Uni ;*
- *du ministère de l'Éducation, Finlande ;*
- *du ministère de l'Éducation, Espagne ;*
- *de la Lifelong Learning Foundation, Royaume-Uni.*

Le projet a également reçu un soutien essentiel, pour ce qui est des questions scientifiques, financières et d'organisation, de la part de l'Institut RIKEN de la science du cerveau (Japon) ; de l'Institut Sackler (États-Unis) ; du Learning Lab Denmark (Danemark) ; du Centre pour la neuroscience et l'éducation (ZNL) de l'Université d'Ulm (Allemagne) ; de l'INSERM (France) ; de l'Université de Cambridge (Royaume-Uni) ; de l'Académie des sciences (France) ; de l'Université et de la ville de Grenade (Espagne) ; et de la Royal Institution (Royaume-Uni).

À l'OCDE, le responsable du projet « Sciences de l'apprentissage et recherche sur le cerveau », Bruno della Chiesa, était également en charge de la réalisation du présent rapport, avec Cassandra Davis, Koji Miyamoto et Keiko Momii. Des apports substantiels ont été apportés par Christina Hinton, Eamonn Kelly, Ulrike Rimmele et Ronit Strobel-Dahan, consultants. La version anglaise du rapport proprement dit (partie I) de ce livre a été éditée par David Istance et la version française par Bruno della Chiesa. Le livre a été relu et corrigé, en tout ou en partie, par Jarl Bengtsson, Delphine Grandrieux, David Istance, Christina Hinton, Atsushi Iriki, Masao Ito, Jellemer Jolles, Hideaki Koizumi, Michael Posner, Ulrike Rimmele, Adriana Ruiz Esparza, Ronit Strobel-Dahan et le « Brain Team » du CERI.

Au sein du Secrétariat, Jarl Bengtsson a pris l'initiative de lancer ce projet et a constamment apporté son soutien stratégique et critique ; Tom Schuller l'a suivi lors de la seconde phase ; la logistique a été mise en place et assurée par Vanessa Christoph, Emily Groves et Carrie Tyler (par ordre chronologique de succession) ; Cassandra Davis était l'éditeur du site Internet.

Barbara Ischinger,
Directrice, Direction de l'éducation

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Remerciements

Au nom du Secrétariat, Bruno della Chiesa voudrait :

- Dédier ce travail à Jarl Bengtsson, le cerveau à l'origine du projet « Sciences de l'apprentissage et recherche sur le cerveau ».
- Exprimer toute sa gratitude et une reconnaissance toute particulière à Eric Hamilton, Masao Ito, Eamonn Kelly, Hideaki Koizumi, Michael Posner, et Emile Servan-Schreiber, pour leur engagement sans faille tout au long du projet.
- Remercier de leur soutien les principaux partenaires du projet, pour leur importantes contributions (financières et/ou substantielles) : Richard Bartholomew et son équipe, Christopher Brookes, Eamonn Kelly, Juan Gallo et son équipe, Eric Hamilton et son équipe, Masayuki Inoue et son équipe, Søren Kjær Jensen et son équipe, Reijo Laukkanen et son équipe, Pierre Léna et son équipe, Francisco Lopez Ruperez, José Moratalla et son équipe, Teiichi Sato, Sylvia Schmelkes del Valle, Hans Siggaard Jensen et son équipe, Finbarr Sloane.
- Remercier les scientifiques de haut niveau qui ont fait preuve d'un profond engagement dans le projet : Brian Butterworth, Stanislas Dehaene, Christina Hinton, Jellemer Jolles, Heikki Lyytinen, Bruce McCandliss, Ulrike Rimmele, Nuria Sebastian, Manfred Spitzer.
- Remercier Hilary Barth, Antonio Battro, Daniel Berch, Leo Blomert, Elisa Bonilla, John Bruer, Tom Carr, Marie Cheour, Guy Claxton, Frank Coffield, Stanley Colcombe, Margarete Delazer, Guinevere Eden, Linnea Ehri, Michel Fayol, Uta Frith, Michael Fritz, Ram Frost, Peter Gärdenfors, Christian Gerlach, Usha Goswami, Sharon Griffin, Peter Hannon, Takao Hensch, Katrin Hille, Shu Hua, Petra Hurks, Walo Hutmacher, Atsushi Iriki, Layne Kalbfleisch, Ryuta Kawashima, Arthur Kramer, Morten Kringelbach, Stephen Kosslyn, Jan de Lange, Cindy Leaney, Geoff Masters, Michael Meaney, Michael Miller, Fred Morrison, Risto Näätänen, Kevin Ochsner, David Papo, Raja Parasuraman, Eraldo Paulesu, Ken Pugh, Denis Ralph, Ricardo Rosas, Wolfgang Schinagl, Mark Seidenberg, David Servan-Schreiber, Bennett Shaywitz, Sally Shaywitz, Elizabeth Spelke, Pio Tudela, Harry Uylings, Janet Werker, Daniel Wolpert, Johannes Ziegler, tous experts de haut niveau, impliqués dans le vaste réseau créé par le projet.
- Remercier pour leur hospitalité, et pour avoir mis à disposition du projet leurs locaux, leur matériel et leur temps, permettant ainsi la réussite des conférences trandisciplinaires du projet (par ordre d'entrée en scène) : le Sackler Institute, États-Unis; l'Université de Grenade, Espagne; le RIKEN Brain Science Institute, Japon; le National Board of Education, Finlande; la Royal Institution, Royaume-Uni ; l'INSERM, France; le ZNL de l'Université de l'hôpital psychiatrique de Ulm, Allemagne ; le Learning Lab, Danemark; le ministère espagnol de l'Éducation, Espagne; l'Académie des sciences, France; le Research Institute for Science and Technology for Society (RISTEX) de la Japan Science and Technology Agency (JST), Japon ; et le Centre for Neuroscience in Education de l'Université de Cambridge, Royaume-Uni.

- Remercier les rédacteurs et tous ceux qui ont à un titre ou un autre contribué à cette publication : Christopher Ball, Bharti, Frank Coffield, Mélanie Daubrosse, Gavin Doyle, Karen Evans, Kurt Fisher, Ram Frost, Christian Gerlach, Usha Goswami, Rob Harriman, Liet Hellwig, Katrin Hille, Christina Hinton, David Istance, Marc Jamous, Jellemer Jolles, Eamonn Kelly, Sandrine Kelner, Hideaki Koizumi, Morten Kringelbach, Raja Parasuraman, Odile Pavot, Michael Posner, Ulrike Rimmele, Adriana Ruiz Esparza, Nuria Sebastian, Emile Servan-Schreiber, Ronit Strobel-Dahan, Collette Tayler, Rudolf Tippelt, Johannes Ziegler.
- Remercier les traducteurs : Jean-Daniel Brèque, Isabelle Hellyar, Duane Peres, Amber Robinson, Marie Surgers.
- Remercier les collègues des Ressources humaines pour avoir lancé et mis en place les deux événements « Conscience du cerveau » au siège de l'OCDE ainsi que les collègues de la Direction des affaires publiques et de la communication pour leur soutien et toute leur compréhension.
- Remercier les membres du Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement (CERI) qui se sont impliqués dans ce projet à un titre ou à un autre : Francisco Benavides, Tracey Burns, Emma Forbes, Stephen Girasuolo, Jennifer Gouby, Delphine Grandrieux, David Istance, Kurt Larsen, Sue Lindsay, Cindy Luggery-Babic et Tom Schuller.
- Et pour finir remercier le dévoué « Brain Team » du CERI : Jarl Bengtsson, Vanessa Christoph, Cassandra Davis, Emily Groves, Koji Miyamoto, Keiko Momii, et Carrie Tyler, sans qui tout ce travail n'aurait pas été possible.

Table des matières

Résumé 13

Partie I
Le cerveau apprenant

Introduction 23

Chapitre 1. **Un abécédaire du cerveau** 27

Apprentissage 28
Bases neurales du phénomène d'apprentissage 28
Cerveau 28
Développement 29
Émotions 29
Fonctions cognitives 30
Génétique 30
Habiletés (« Skills ») 30
Intelligence 31
J'entends, j'oublie. Je vois, je me souviens. Je fais, je comprends. [Confucius] 31
Kafka 32
Langage 32
Mémoire 33
Neurone 33
Opportunité (fenêtres d') 34
Plasticité 34
Qualité, hygiène de vie 35
Représentations 35
Sociales (interactions) 35
Tu me dis, j'oublie, Tu m'enseignes, je me souviens, Tu m'impliques, j'apprends. [Benjamin Franklin] 36
Universalité 36
Variabilité 37
W comme « travail » 37
… XYZ 37

Chapitre 2. **Comment le cerveau apprend tout au long de la vie** 39

L'architecture du cerveau : les bases 41
Organisation fonctionnelle 42

La structure du cerveau 43
Comment le cerveau apprend au cours de la vie 46
Plasticité et périodes sensibles 46
La petite enfance (environ 3 à 10 ans) 47
L'adolescence (environ 10 à 20 ans) 50
L'âge adulte et la vieillesse 54
Récupérer grâce à l'apprentissage des fonctions cérébrales atteintes 55
Surmonter le déclin des fonctions cognitives 55
Récupérer les fonctions cérébrales endommagées 57
Conclusions 61
Références 62

Chapitre 3. **L'impact de l'environnement sur l'apprentissage** 65
Interactions sociales 68
Régulation des émotions 69
Motivation 77
Sommeil et apprentissage 79
Conclusions 83
Références 83

Chapitre 4. **Littératie et cerveau** 89
Langage et sensibilités du développement 91
La littératie au niveau cérébral 93
L'influence de la langue sur le développement de la littératie 94
Dyslexie développementale 96
Conclusions 99
Références 100

Chapitre 5. **Numératie et cerveau** 103
Création de la numératie 104
Des nourrissons qui calculent 105
La numératie au niveau cérébral 106
Nombres et espace 108
Le rôle de l'instruction 108
Sexe et mathématiques 110
Entraves à l'apprentissage mathématique 110
Conclusions 111
Références 112

Chapitre 6. **Dissiper les neuromythes** 115
Qu'est-ce qu'un « neuromythe » ? 116
« Il n'y a pas de temps à perdre car pour le cerveau tout se joue avant l'âge de trois ans » 117
« Il existe des périodes "critiques" où certains enseignements/apprentissages sont indispensables » 119

« Mais j'ai lu quelque part que nous n'utilisons que 10 % de notre cerveau de toute façon… » 121
« Je suis "cerveau gauche", elle est "cerveau droit"… » 123
« Il faut bien reconnaître que le cerveau de l'homme est différent du cerveau de la femme » 127
« Le cerveau d'un jeune enfant ne peut correctement apprendre qu'une seule langue à la fois » 128
« Améliorez votre mémoire ! » 130
« Apprenez en dormant ! » 132
Conclusions 134
Références 135

Chapitre 7. **Éthique et organisation de la neuroscience de l'éducation** 139
Les défis éthiques qui attendent la neuroscience de l'éducation 140
Dans quels buts et pour qui ? 141
Questions éthiques concernant l'utilisation des produits agissant sur le cerveau 142
Interface cerveau-machine – qu'est-ce qu'être humain ? 143
Les risques d'une approche trop scientifique de l'éducation ? 143
Créer une nouvelle approche trandisciplinaire pour comprendre les apprentissages 144
Transdisciplinarité 144
Contributions réciproques de part et d'autre : progrès bidirectionnel 150
Au-delà des frontières nationales : pour des initiatives internationales 157
Précautions et limites 160
Références 161

Conclusions et perspectives d'avenir 163
Messages clés et conclusions 164
Les grands thèmes de recherche à venir 169
Naissance d'une science de l'apprentissage 170
Références 171

Partie II

Articles en coopération

Article A. **Cerveau, développement et apprentissage durant la petite enfance** 175
A.1. Introduction 176
A.2. Que savons-nous du développement cérébral chez les nouveaux-nés, les bébés et les jeunes enfants ? 176
A.2.1. Processus du développement initial du cerveau 176
A.2.2. Le rôle de l'expérience 178
A.2.3. Choisir le bon moment – les facteurs importants du développement cérébral 178
A.2.4. La plasticité, caractéristique fondamentale du cerveau des bébés 179

A.2.5. Périodes critiques ou sensibles du développement neural? 180
A.2.6. Périodes sensibles et plasticité cérébrale 181
A.2.7. Apprendre durant la petite enfance, et au-delà. 182
A.3. Quelle est l'importance des premières années de la vie dans le développement et l'apprentissage?. 183
A.3.1. Les avantages des programmes destinés aux jeunes enfants 183
A.3.2. L'apprentissage, élément crucial de la petite enfance 184
A.3.3. Ce qui nuit à l'apprentissage 185
A.3.4. Soins et éducation à la petite enfance : il n'y a pas de baguette magique 186
A.4. Les environnements qui favorisent le développement des jeunes enfants . . 186
A.4.1. Les liens subtils entre jeu et apprentissage 186
A.4.2. Rôles des programmes et des orientations pédagogiques dans le développement du jeune enfant 187
A.4.3. Favoriser l'acquisition du langage 188
A.4.4. Comment encourager l'apprentissage chez les jeunes enfants 188
A.5. Les défis à relever pour synthétiser les résultats des recherches en neuroscience et en sciences de l'éducation 190
A.6. Réactions du praticien. 191
Références 194

Article B. **Le cerveau et l'apprentissage à l'adolescence**. 199
B.1. Introduction 200
B.2. Le développement cérébral – de quoi s'agit-il?. 200
B.2.1. Le développement cérébral au niveau microscopique 200
B.2.2. Le développement cérébral au niveau macroscopique. 201
B.2.3. Le développement cérébral peut être examiné à de nombreux niveaux 202
B.2.4. Techniques d'imagerie cérébrale 202
B.2.5. Il est difficile de déterminer le rôle de l'inné et de l'acquis dans le développement cérébral 203
B.3. L'expérience modèle le cerveau 204
B.3.1. Activité cérébrale au fil du temps 204
B.3.2. Structure cérébrale au fil du temps 205
B.3.3. Les relations entre le cerveau et le comportement doivent souvent faire l'objet de déductions indirectes 206
B.3.4. Enfants et adultes n'utilisent pas leur cerveau de la même manière . 206
B.3.5. Cerveau adolescent et modifications du comportement 207
B.3.6. Résumé et implications 208
B.4. Théories de l'apprentissage à l'adolescence et évolution au cours de la vie . 209
B.4.1. Implications pour l'enseignement et l'apprentissage à l'adolescence . 213
B.5. Défis et pistes à venir 215
B.6. Réactions du praticien : J'ai fait un rêve 217
B.6.1. Un nouveau regard sur l'enseignement 217
B.6.2. Faut-il fixer de nouveaux buts à l'école et de nouvelles missions aux enseignants?. 220
Références 221

Article C. **Cerveau, cognition et apprentissage à l'âge adulte** 225
C.1. Introduction 226
C.1.1. Qu'est-ce que l'apprentissage ? 226
C.1.2. Le cerveau humain à l'âge adulte 227
C.1.3. Vue d'ensemble de l'article 227
C.2. L'âge adulte : cognition et apprentissage au fil du temps 228
C.2.1. Vieillissement et cognition 228
C.2.2. L'apprentissage tout au long de la vie : la perspective de l'éducation des adultes 229
C.3. Vieillissement et fonctions cérébrales : la neuroimagerie structurelle 231
C.4. Vieillissement et fonctions cérébrales : la neuroimagerie fonctionnelle 232
C.5. Différences individuelles dans les modifications cérébrales et cognitives au cours du temps 233
C.6. La génétique et les différences individuelles en matière de cognition 234
C.7. Entraînement et vieillissement 236
C.7.1. Entraînement cognitif 236
C.7.2. La formation : les perspectives pour le développement 236
C.8. L'apprentissage pour adultes : créer des environnements favorables 239
C.8.1. L'apprentissage fondé sur les compétences : pour préparer à résoudre des problèmes 239
C.8.2. L'apprentissage constructiviste : mettre à profit des expériences subjectives 239
C.8.3. L'apprentissage *in situ* : organiser les environnements d'apprentissage . . 240
C.9. Programme de travail 241
C.10. Réactions du praticien 242
Références 246

Annexe A. Les forums 251

Annexe B. Technologies d'imagerie cérébrale 257

Glossaire 263

Autres ouvrages disponibles dans la collection CERI 277

Encadrés

2.1. La Learning Therapy (Japon) 60
3.1. Nutrition 67
3.2. Les aspects organiques de l'attention 72
3.3. Exercice physique 74
3.4. Musique 76
3.5. Jeu 78
3.6. Jeux vidéo 79
3.7. Niveaux sonores 82
7.1. Esprit, cerveau et éducation (« Mind, Brain and Education » ou « MBE ») 149
7.2. Le Centre pour les neurosciences dans l'éducation : Université de Cambridge, Royaume-Uni 150
7.3. Learning Lab Denmark 151

7.4. Université de Harvard Graduate School of Education 152
7.5. Le point de vue des éducateurs sur le rôle de la neuroscience dans l'éducation 153
7.6. Technologie et éducation : une perspective mondiale 155
7.7. Le Centre de transfert pour la neuroscience et l'apprentissage (ZNL), Ulm, Allemagne. 156
7.8. JST-RISTEX, Japan Science and Technology-Research Institute of Science and Technology for Society, Japon 157
7.9. La neuroscience de l'éducation aux Pays-Bas. 159
A.1. Émotions et mémoire (apprentissage) 177
A.2. Le développement initial du langage 181
A.3. Les neurones miroirs 182
B.1. Le principe de l'IRM 203
B.2. Le principe de la TEP et de l'IRMf 203
A. Qu'est ce que l'IRMf ? 258
B. La topographie optique en proche infrarouge utilisée en sciences de l'apprentissage et en recherche sur le cerveau 260

Tableaux

2.1. Comment le cerveau apprend : récapitulatif 53
2.2. Déclin ou atteintes des fonctions cérébrales, et solutions possibles 61

Graphiques

2.1. Connection synaptique entre deux neurones 42
2.2. Principales régions du cortex cérébral. 44
2.3. Le lobe frontal 45
2.4. Le cerveau de l'adolescent. 51
3.1. Structure interne du cerveau humain, comprenant le système limbique 70
5.1. Aires cérébrales 108
7.1. L'évolution de la transdisciplinarité 146
7.2. Échange bidirectionnel entre recherche et pratique 152
A. Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. 258

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

Résumé

L'éducation est une épée à double tranchant. Elle peut devenir dangereuse si elle n'est pas maniée correctement.

Wu Ting-Fang

Après vingt ans d'un travail de pointe en neurosciences, la communauté éducative prend conscience du fait que « comprendre le cerveau » peut indiquer de nouvelles voies de recherche et améliorer politiques et pratiques éducatives. Ce rapport constitue un panorama synthétique de l'apprentissage informé par le fonctionnement cérébral, et soumet des thèmes cruciaux à l'attention de la communauté éducative. Il ne propose pas de solutions simplistes, ni ne prétend que la neuroscience ait réponse à tout. En revanche, il constitue un état des lieux objectif des connaissances actuelles au carrefour des neuroscience cognitives et de l'apprentissage; il indique également des pistes à explorer, et liste des implications politiques pour la prochaine décennie.

La première partie, « Le cerveau apprenant », constitue le rapport proprement dit. Il est issu de sept ans d'analyses et de travaux du projet « Sciences de l'apprentissage et recherche sur le cerveau » du CERI de l'OCDE. La seconde partie, « Articles en coopération », contient trois réflexions portant sur le cerveau apprenant, durant la petite enfance, à l'adolescence et à l'âge adulte respectivement. Chacun est l'œuvre de trois experts, qui ont mis en commun expérience et connaissances pour réunir les perspectives de la neuroscience et de l'éducation. L'annexe A est tirée du site Internet interactif, ouvert à la société civile et comprenant un forum destiné aux enseignants. L'annexe B présente au lecteur les dernières avancées en matière de technologies d'imagerie cérébrale, qui sont au cœur des découvertes étudiées dans ce rapport.

Le premier chapitre est un abécédaire de mots clés, qui présente brièvement des concepts complexes et permet au lecteur de se référer aux chapitres correspondants pour plus de détails. Le début du chapitre suivant présente ce qu'il faut savoir de l'architecture et du fonctionnement du cerveau.

Comment le cerveau apprend au long de la vie

Les neuroscientifiques ont clairement montré que le cerveau dispose d'une grande capacité d'adaptation aux demandes de son environnement : la plasticité. Des connexions neuronales sont créées ou renforcées, d'autres sont affaiblies ou éliminées, selon les besoins. L'ampleur de la modification dépend du *type* d'apprentissage effectué : l'apprentissage à long terme entraîne des modifications plus profondes. Elle dépend aussi du *moment* où l'apprentissage a lieu : chez les bébés, la création de nouvelles synapses se

fait à un rythme extraordinaire. Mais l'un des messages les plus fondamentaux reste celui-ci : la plasticité est une caractéristique fondamentale du cerveau tout au long de la vie.

Malgré cette plasticité permanente, il existe des périodes idéales ou « sensibles » durant lesquelles un apprentissage donné présentera une efficacité maximale. Pour les stimuli sensoriels (tels les sons du langage) et pour certaines expériences émotionnelles et cognitives (telle l'exposition à une langue), les périodes sensibles sont assez brèves et se situent à un âge assez jeune. D'autres compétences (comme l'acquisition de vocabulaire) ne connaissent pas de période sensible nette et peuvent être apprises de façon optimale tout au long de la vie.

Les images de cerveaux d'adolescents montrent qu'ils sont loin d'être arrivés à maturité, et qu'ils subissent d'importantes modifications structurelles bien après la puberté. L'adolescence est une période fondamentale pour le développement émotionnel, en raison de la grande quantité d'hormones présentes dans le cerveau; l'immaturité du cortex préfrontal des adolescents joue sans doute un rôle crucial dans l'instabilité de leur comportement. Nous traduisons cette combinaison d'immaturité émotionnelle et de fort potentiel cognitif par l'expression : « la puissance est là, mais pas le contrôle ».

Chez les adultes plus âgés, l'aisance ou l'expérience dans une tâche donnée peut réduire le niveau d'activité cérébrale : on peut considérer cela comme une preuve d'un traitement plus efficace. Mais le cerveau décline quand on l'utilise moins, ainsi que quand on vieillit. Des études ont montré qu'apprendre peut limiter le déclin cérébral : plus les personnes d'âge mûr ont l'occasion d'apprendre (*via* des cours pour adultes, leur métier ou des activités sociales), plus elles ont de chances de retarder l'apparition de maladies neurodégénératives, ou d'en limiter le développement.

L'importance de l'environnement

La neuroscience montre que la façon dont on nourrit et traite le cerveau joue un rôle crucial dans les processus d'apprentissage, et commence à déterminer quels sont les environnements les plus favorables à l'apprentissage. La plupart des façons d'améliorer le fonctionnement cérébral dépendent de facteurs simples et quotidiens – qualité de l'environnement social et des rapports humains, alimentation, exercice physique et sommeil – qui semblent tellement évidents qu'on a tendance à négliger leur importance. En prêtant attention à l'état du cerveau et du corps, il est possible de mettre à profit la plasticité cérébrale et de faciliter l'apprentissage. 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.

Au centre du cerveau humain se trouve un ensemble de structures parfois appelé « cerveau émotionnel » : le système limbique. On sait aujourd'hui que nos émotions « sculptent » le tissu neural. En cas de stress excessif ou de peur intense, les processus neuraux de régulation émotionnelle sont perturbés, ce qui diminue les capacités de jugement social et les performances cognitives. Le stress rend performant et améliore la cognition et l'apprentissage, mais au-delà d'un certain niveau, on obtient l'effet inverse. Quant aux émotions positives, il est clair que l'un des plus grands facteurs de motivation est ce sentiment d'illumination qui se produit lorsqu'on comprend un nouveau concept; le cerveau réagit très bien à cette sensation. L'école devrait faire en sorte que les enfants découvrent très jeunes le plaisir de comprendre, se rendant ainsi compte qu'apprendre est une expérience très agréable.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Pour apprendre efficacement, il est très important de savoir gérer ses émotions; l'autorégulation est l'une des compétences émotionnelles et comportementales les plus importantes parmi celles qui sont nécessaires à l'enfant comme à l'adulte dans leurs environnements sociaux. Les émotions guident ou perturbent les processus psychologiques tels que la concentration ou la résolution de problèmes, et influencent les relations humaines. La neuroscience (appuyée sur la psychologie cognitive et l'étude du développement de l'enfant) commence à identifier d'importantes régions cérébrales dont l'activité et le développement sont en relation avec le self-control.

Langage, littératie et cerveau

Le cerveau est biologiquement préparé à acquérir le langage dès le début de la vie, mais ce processus doit être catalysé par l'expérience. Il existe une relation inverse entre l'âge et l'efficacité de l'apprentissage pour de nombreux aspects des langues : en général, plus jeune est l'apprenant, plus efficace est l'apprentissage. La neuroscience connaît mieux à présent les différences dans la façon dont enfants et adultes gèrent le langage au niveau cérébral. Cela pourrait avoir d'importantes répercussions sur les politiques éducatives concernant l'enseignement des langues étrangères, qui ne commence souvent qu'à l'adolescence. Adolescents et adultes sont bien sûr capables d'apprendre une nouvelle langue, mais cela leur est plus difficile.

L'importance simultanée, dans la façon dont le cerveau gère le langage, du traitement phonologique et du traitement sémantique « direct » peut alimenter le débat classique autour des méthodes de lecture. Comprendre le rôle et la place de ces deux processus permet d'avancer que la meilleure façon d'enseigner la lecture combine l'instruction dite « syllabique » et la méthode dite « globale », l'importance relative de chacune de ces approches devant être fonction des caractéristiques morphologiques de la langue concernée.

Une grande partie des circuits cérébraux permettant la lecture est commune à toutes les langues, mais il existe des différences lorsque les spécificités de chaque langue nécessitent des fonctions particulières (par exemple en cas de différences dans les types d'encodage ou les stratégies de reconnaissance des mots). Pour se limiter provisoirement aux langues alphabétiques, ce rapport s'intéresse surtout aux différents niveaux de « transparence » des orthographes : une langue « non transparente » comme l'anglais ou le français (c'est-à-dire une langue dans laquelle la correspondance entre les sons et les lettres est très variable) s'oppose à une langue « transparente » (à l'orthographe plus « cohérente », par exemple le finnois ou le turc). Des structures cérébrales spécifiques sont activées pour gérer les aspects de la lecture propres à chaque langue.

La dyslexie est très répandue et ignore les frontières culturelles et socio-économiques. Elle est souvent associée à des caractéristiques corticales atypiques à l'arrière de l'hémisphère gauche et entraîne des difficultés à traiter les éléments sonores de la langue. Sur le plan *linguistique*, les conséquences en sont relativement minimes (confusion des mots à la prononciation similaire), mais les conséquences pour la *littératie* peuvent être énormes, car relier les phonèmes aux symboles écrits est indispensable à toute lecture dans une langue alphabétique. La neuroscience réalise actuellement d'importantes avancées, tant pour ce qui est du diagnostic que pour ce qui est de la remédiation.

Numératie et cerveau

La numératie, comme la littératie, est créée dans le cerveau *via* une synergie entre biologie et expérience. L'évolution a développé certaines structures cérébrales pour traiter le langage; de la même façon il en existe d'autres permettant une perception quantitative. Et, toujours comme pour le langage, les structures génétiquement prévues ne suffisent pas à gérer les mathématiques; elles travaillent en coordination avec d'autres circuits neuraux, non prévus pour la numératie mais adaptés au traitement de celle-ci par l'expérience. On voit combien l'éducation est importante (à l'école, à la maison ou par le jeu), et donc combien la neuroscience peut aider dans cette mission éducative.

La neuroscience des mathématiques n'en est qu'à ses balbutiements, mais le domaine a déjà beaucoup progressé ces dix dernières années. On sait aujourd'hui qu'effectuer des opérations simples nécessite la collaboration de nombreuses structures situées dans différentes régions du cerveau. La simple représentation d'un nombre implique un circuit complexe qui fait appel à la représentation de magnitude, à la représentation visuelle et à la représentation verbale. Le calcul nécessite lui aussi un réseau complexe, qui varie selon l'opération effectuée : la soustraction dépend du circuit pariétal inférieur, alors que l'addition et la multiplication activent d'autres réseaux neuraux. Actuellement la neuroscience sait peu de choses sur les mathématiques avancées, mais il semble que les circuits activés par des opérations complexes soient au moins partiellement distincts.

Comprendre les voies développementales qui permettent l'accès aux mathématiques d'un point de vue cérébral peut faciliter la mise au point des méthodes didactiques. Des méthodes différentes peuvent déboucher sur la création de voies neurales plus ou moins efficaces : l'apprentissage par répétition crée des circuits neuraux moins efficaces que l'apprentissage par stratégie. La neuroscience montre la supériorité de méthodes qui permettent d'apprendre de façon détaillée, précise et réfléchie sur celles qui cherchent à identifier des résultats exacts ou inexacts. Cela va dans le sens des idées qui sous-tendent l'évaluation formative.

Les fondements neuraux de la dyscalculie – l'équivalent mathématique de la dyslexie – sont encore peu connus, mais l'étude des caractéristiques biologiques associées à des troubles mathématiques précis suggère que les mathématiques ne sont pas une construction purement culturelle : elles sont régies par des structures cérébrales spécifiques qui doivent fonctionner correctement. Les circuits neuraux dont la déficience cause la dyscalculie peuvent probablement être rétablis grâce à des interventions ciblées, en raison de la « plasticité » (ou flexibilité) des réseaux impliqués dans le traitement des mathématiques.

Dissiper les « neuromythes »

Ces dernières années, de plus en plus d'idées fausses se sont mises à circuler à propos du cerveau. L'éducation est concernée par ces « neuromythes », qui prennent souvent la forme de théories sur la façon dont on apprend. À leur base, on trouve souvent un fait scientifiquement exact, ce qui les rend plus difficile à identifier – et à réfuter. Ils sont incomplets, exagérés, voire totalement faux : il faut donc les disqualifier, de peur que le système scolaire ne se fourvoie.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Pour chaque « mythe » ou groupe de mythes, on étudie la façon dont il est apparu dans la conscience populaire, et on explique en quoi il est scientifiquement inexact. Ils sont répartis ainsi :

- « Il n'y a pas de temps à perdre, car pour le cerveau tout se joue avant trois ans ».
- « Il existe des périodes durant lesquelles certains enseignements/apprentissages sont indispensables ».
- « Mais j'ai lu quelque part que nous n'utilisons que 10 % de notre cerveau de toute façon ».
- « Je suis "cerveau gauche", elle est "cerveau droit" ».
- « Il faut bien reconnaître que le cerveau de l'homme est différent de celui de la femme ».
- « Le cerveau d'un jeune enfant ne peut correctement apprendre qu'une langue à la fois ».
- « Améliorez votre mémoire ! »
- « Apprenez en dormant ! »

Éthique et organisation de la neuroscience de l'éducation

Cette nouvelle discipline est riche de promesses ; il ne faut pas pour autant ignorer les questions éthiques qu'elle soulève.

Dans quel but, et pour qui ? Il importe de réfléchir aux usages et aux abus des techniques d'imagerie cérébrale. Comment s'assurer que les données médicales resteront confidentielles et ne seront pas communiquées à des entreprises ou à des institutions scolaires? Plus la technologie permettra d'identifier des caractéristiques auparavant secrètes et indécelables, plus il faudra être vigilant sur leurs utilisations dans le domaine éducatif.

Utilisation de produits qui agissent sur le cerveau : La limite entre usage médical et usage non médical n'est pas toujours évidente. La question se pose surtout quand des individus sains absorbent des substances qui agissent sur l'état et le fonctionnement de leur cerveau. Les parents doivent-ils avoir le droit d'administrer à leurs enfants des produits pour améliorer leurs performances scolaires, avec les risques associés – de la même manière que des sportifs peuvent se doper?

Cerveaux et machines : On arrive de mieux en mieux à combiner organes vivants et technologie, ce qui recèle un énorme potentiel pour les handicapés – alors susceptibles, par exemple, de contrôler des machines à distance. Mais ces mêmes technologies pourraient permettre de contrôler le comportement des gens, ce qui est bien sûr source d'inquiétudes.

Une approche « trop scientifique » de l'éducation ? La neuroscience peut apporter un éclairage très utile, mais si par exemple les « bons » enseignants étaient repérés grâce à l'impact qu'ils ont sur le cerveau de leurs élèves, le scénario serait bien différent : on courrait le risque de créer un système éducatif qui reposerait trop sur les mesures scientifiques et serait terriblement conformiste et monocolore.

La neuroscience éducative n'en est qu'à ses débuts. Pour qu'elle se développe dans les meilleures conditions possibles, elle doit être trans-disciplinaire (utile à la fois aux communautés scientifique et éducative) et internationale. Il est indispensable d'établir une méthodologie et un vocabulaire communs. Il s'agit d'établir une relation réciproque entre pratique éducative et recherche sur l'apprentissage, similaire à la relation entre médecine

et biologie, en créant et en entretenant un échange d'informations bidirectionnel et continu, nécessaire à une pratique éducative reposant sur ce qu'on sait du fonctionnement cérébral.

Le désir de progresser dans ce domaine a été à l'origine d'institutions, de réseaux, d'initiatives variés. Ce rapport contient des encadrés décrivant les exemples les plus marquants à ce jour, comme l'« Institut de recherche en science et technologie pour la société » de l'Agence japonaise de la science et de la technologie (JST-RISTEX); le Centre de transfert pour la neuroscience et l'apprentissage (ZNL), Ulm, Allemagne; le Learning Lab Denmark, Danemark; le Centre pour les neurosciences dans l'éducation, Université de Cambridge, Royaume-Uni; le programme « Esprit, cerveau et éducation » (MBE pour « Mind, Brain, and Education ») de la Harvard Graduate School of Education, Université de Harvard, États-Unis.

Messages clés et perspectives

La neuroscience de l'éducation débouche sur des connaissances précieuses et neuves, qui permettent d'informer politiques et pratiques éducatives : sur bien des sujets, la neuroscience confirme des éléments déjà connus et observables dans la vie quotidienne, mais elle permet de passer de la simple corrélation à la causalité (comprendre les mécanismes à l'œuvre dans des processus familiers), ce qui facilite l'élaboration d'approches efficaces. Sur d'autres sujets, la neuroscience génère de nouvelles connaissances et ouvre de nouvelles pistes.

Les recherches sur le cerveau apportent des éléments neuroscientifiques importants qui permettent de favoriser l'apprentissage tout au long de la vie : loin de soutenir l'idée qu'il faut surtout éduquer les jeunes – même s'il est vrai que ceux-ci disposent d'un fabuleux potentiel d'apprentissage –, la neuroscience a montré que l'apprentissage se fait tout au long de la vie, et que plus on continue d'apprendre, mieux on apprend.

La neuroscience confirme qu'il est toujours bénéfique d'apprendre, surtout chez les personnes âgées : on a de plus en plus conscience que l'éducation apporte de nombreux « bénéfices » (au-delà des éléments économiques si importants dans l'élaboration des politiques éducatives). La neuroscience est en train de montrer que l'apprentissage est très utile pour remédier à la démence sénile, un problème capital dans nos sociétés.

Le besoin d'approches globales, prenant en compte l'interdépendance du corps et de l'esprit, de l'émotionnel et du cognitif : prendre conscience de l'importance du cerveau ne veut pas dire qu'on ne s'intéresse plus qu'aux aspects cognitifs et aux performances. Au contraire, il ressort à quel point il importe d'adopter une approche globale, qui tienne compte des liens étroits entre bien-être physique et intellectuel, aspects émotionnels et cognitifs, esprit analytique et capacités créatrices.

Comprendre l'adolescence – la puissance est là, mais pas le contrôle : il est très important de comprendre l'adolescence, car c'est un âge clé en matière éducative, et ce qui se passe à ce moment-là chez un individu a généralement des conséquences pour toute sa vie ultérieure. Les adolescents ont des capacités cognitives très développées (« la puissance est là »), mais n'ont pas encore atteint la maturité émotionnelle (« mais pas le contrôle »). On ne doit certes pas en conclure qu'il faille nécessairement attendre l'âge adulte pour prendre des décisions importantes pour l'avenir. En revanche, il serait plus que souhaitable que les choix effectués à cette période de la vie ne soient pas définitifs, et puissent être modulés plus tard.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Tenir compte de la neuroscience dans la conception des programmes et l'organisation de la scolarité : à ce sujet, le message exprimé dans ce rapport est très nuancé. Il n'existe pas de « périodes critiques » durant lesquelles un apprentissage donné *doit* se faire, mais des « périodes sensibles », durant lesquelles un apprentissage sera plus efficace (l'apprentissage langagier est ici étudié de près). Ce rapport souligne l'importance de bases solides pour l'apprentissage tout au long de la vie, donc insiste sur l'éducation des jeunes enfants et la maîtrise des compétences de base.

Faire en sorte que la neuroscience contribue à résoudre les principaux problèmes auxquels l'apprentissage est confronté, y compris les « 3 D » : dyslexie, dyscalculie, démence. On a longtemps ignoré les causes de la dyslexie, par exemple ; mais aujourd'hui on sait qu'elle est principalement due à une atypie du cortex auditif (voire peut-être, dans certains cas, du cortex visuel), et on arrive à l'identifier chez des enfants très jeunes. La remédiation est d'autant plus efficace que l'enfant est jeune, mais elle reste souvent possible chez les plus grands.

Des évaluations plus personnalisées qui améliorent l'apprentissage, sans sélectionner ni exclure : la neuroimagerie peut grandement faciliter l'identification des caractéristiques d'apprentissage d'un individu, et permettrait de personnaliser les méthodes d'évaluation. Cela dit, elle pourrait aussi déboucher sur des moyens de sélection et d'exclusion plus puissants que ceux que nous connaissons aujourd'hui.

Ces thèmes clés sont des priorités pour la recherche en neuroscience ; il ne s'agit pas d'un programme exhaustif, mais des conclusions tirées du présent rapport. Ce programme de recherche – qui a pour but de mieux comprendre les moments optimaux pour chaque type d'apprentissage, le développement et la régulation des émotions, l'influence des outils et de l'environnement, et le traitement du langage et des mathématiques – conduirait à la naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage, science nécessairement trans-disciplinaire.

C'est sur cette aspiration que ce rapport s'achève, et c'est elle qui lui donne son titre. Nous espérons qu'il sera possible de mettre à profit ces nouvelles connaissances pour créer un système éducatif adapté à l'individu et à la société, c'est-à-dire à la fois personnalisé et universel.

PARTIE I

Le cerveau apprenant

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE I
Introduction

> Nicht das Gehirn denkt, sondern wir denken das Gehirn.
> (Ce n'est pas le cerveau qui pense, mais nous qui pensons le cerveau).
>
> *Friedrich Nietzsche*

La neuroscience[1] ouvre-t-elle réellement des pistes nouvelles pour améliorer l'éducation ? Ce rapport apporte une réponse non dénuée de complexité à cette question : oui, mais… Des éléments convergents confirment l'émergence d'une « neuroscience de l'éducation ». Les récentes avancées dans le domaine de la neuroscience ont considérablement augmenté la pertinence de ce champ disciplinaire pour l'éducation. Les technologies d'imagerie permettent désormais l'observation du cerveau en action, ouvrant ainsi la voie à une meilleure compréhension de ses fonctions cognitives et émotionnelles. Il va sans dire que l'éducation peut en tirer bénéfice. De plus, cette tendance à une plus grande applicabilité de la neuroscience en matière éducative est accompagnée par une réceptivité croissante de la part des sociétés du XXIe siècle. Le présent rapport entend présenter une synthèse de l'état de la recherche à l'intersection des neurosciences cognitives et des apprentissages, et mettre en lumière les implications politiques des résultats de la recherche pour la décennie à venir. Les récentes découvertes sont de nature à aider toutes les parties prenantes du monde de l'éducation – ce qui inclut apprenants, parents, enseignants et décideurs politiques – à mieux comprendre les processus efficaces en matière d'apprentissages, ainsi que les environnements qui leur sont liés. Une telle compréhension peut permettre aux décideurs de s'orienter vers des mesures plus et mieux informées, peut amener les parents à mettre en place un meilleur environnement d'apprentissage pour leurs enfants et aider les apprenants à choisir les approches les plus adaptées pour améliorer leurs compétences.

Il ne s'agit en aucun cas de prétendre que la neuroscience est une panacée qui va révolutionner l'éducation, même à long terme, et encore moins du jour au lendemain. Les promoteurs de ce projet ont, depuis des années, systématiquement précisé que la neuroscience n'était pas susceptible de *résoudre* les problèmes éducatifs. De nombreuses questions se posent, dont les réponses sont à chercher ailleurs, que ce soit dans les sciences de l'éducation elles-mêmes ou dans d'autres disciplines « de référence », notamment dans les sciences sociales, voire dans la philosophie. Pour autant, on ne peut disqualifier en bloc la neuroscience et l'écarter du débat éducatif au motif qu'elle ne peut

1. Pour la commodité de la lecture, le terme « neuroscience » (parfois sous la forme plurielle « neurosciences ») recouvre tout au long de la présente publication les champs sécants du domaine, qu'il s'agisse de neurobiologie, de neuroscience cognitive, de neuroscience comportementale, de psychologie cognitive, etc.

à elle seule fournir des solutions, et encore moins des solutions simples, à des questions d'une grande complexité. Son principal mérite, à ce jour, est d'apporter de nouveaux éclairages sur des points d'achoppement déjà anciens, de soulever de nouvelles questions, de contribuer à confirmer ou à infirmer des hypothèses plus anciennes, voire de renforcer, avec la crédibilité que donne la scientificité, des pratiques existantes – quitte au besoin à en remettre sérieusement en question quelques autres. Ce rapport montre entre autres à quel point une véritable approche transdisciplinaire, mettant en scène autant de domaines que possible, est nécessaire au traitement des questions qui se posent de façon de plus en plus aigues aux sociétés contemporaines[2].

La neuroscience fournit des éléments précis quant à savoir *comment* et *pourquoi* les êtres humains (ou les cerveaux humains) répondent à différents processus et environnements d'apprentissage. De tels éléments sont d'une importance fondamentale lorsque l'on considère que bien des politiques et pratiques éducatives à ce jour reposent sur des informations limitées ou lacunaires, développées au mieux à partir de données quantitatives et qualitatives émanant d'un large spectre de pratiques, d'environnements et de résultats. Si de telles données représentent toujours de solides bases de connaissances, fondées sur des faits, quant aux modes d'apprentissage associés au succès ou à l'échec, elles ne permettent en général pas d'expliciter les raisons profondes desdites observations. Ces raisons restent souvent encore mystérieuses.

À titre d'exemple, lorsque parents, enseignants et décideurs politiques tentent d'identifier le ou les moments les plus adaptés pour enseigner une langue étrangère aux enfants, une « décision informée » a toutes les chances d'être fondée sur une comparaison d'expériences et de performances entre des apprenants soumis à un tel enseignement à différents âges. Une analyse de ce type pourrait conclure que les meilleurs résultats sont obtenus lorsque l'individu commence à apprendre une langue à partir d'un âge donné. Bien qu'une telle information soit utile en soi, elle ne permet pas de déterminer l'importance du facteur « temps », dans un tel cadre, en termes de résultats. Elle ne montre pas non plus comment l'apprentissage d'une langue étrangère peut être optimisé à l'âge en question… voire à d'autres périodes de la vie.

Le lecteur trouvera dans les pages qui suivent un certain nombre d'éclairages présentant un caractère encore relativement hypothétique à ce jour (lorsque par exemple les découvertes présentées sont fondées sur un nombre limité d'études), ainsi que des reformulations de principes largement connus, émanant de la « sagesse » héritée de décennies, voire de siècles de pratiques et de recherches en matière éducative[3]. Toutefois, l'honnêteté intellectuelle la plus élémentaire oblige à présenter comme telles les idées qui n'ont encore que le statut d'hypothèses (nous n'entrerons toutefois pas ici dans les débats scientifiques proprement

2. Le Secrétariat de l'OCDE souhaite dès l'abord clairement se dissocier de toute interprétation de ce livre qui, fondée sur les idées de différences cérébrales individuelles et de styles d'apprentissage différents, tenterait d'établir, au niveau de groupes ou de communautés humaines, un lien quelconque entre certain gènes et QI, impliquant ainsi potentiellement des connotations racistes. De telles interprétations doivent être fermement condamnées.
3. Le lecteur remarquera également que ce rapport ne présente pas de cartographie complète des comparaisons et confrontations entre découvertes neuroscientifiques et théories de l'apprentissage. Pour prométhéenne qu'elle soit, l'ambition du présent ouvrage n'est pas de nature encyclopédique quant aux deux champs considérés. Les informations disponibles ne permettent pas encore d'établir de manière exhaustive les parallélismes et les complémentarités entre les deux domaines. Lorsque cependant de telles comparaisons sont d'ores et déjà possibles, elles sont brièvement mentionnées, pour ainsi dire de façon incidente. Ce travail de mise en relation systématique, qui devrait bientôt être de l'ordre du possible, reste à entreprendre.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

dits, qui dépassent le cadre de notre propos). Faire état d'hypothèses nouvelles présente l'avantage d'indiquer des pistes pour la recherche à venir. Enfin, et ce n'est pas le moindre mérite d'une telle démarche, apporter de l'eau au moulin de certaines approches éducatives par le biais de faits solidement établis par la science est loin d'être vain : à n'en pas douter, un tel exercice confortera souvent des pratiques conventionnelles qui jusqu'ici manquaient cruellement de fondements scientifiques. À l'occasion cependant, on découvrira également que certaines pratiques sont disqualifiées par l'approche neuroscientifique. Ainsi, certains débats qui agitent le monde de l'éducation, parfois depuis toujours, s'en trouveront-ils dépassés. D'autres au contraire seront enrichis par les nouveaux éléments mis au jour. D'autres pistes, d'autres perspectives s'ouvriront pour améliorer les méthodes traditionnelles.

Ce livre est conçu de telle manière que le lecteur puisse choisir de ne lire que tel ou tel chapitre s'il le souhaite. On s'est donc efforcé de rendre chaque chapitre lisible de façon indépendante. Bien entendu, une telle ambition ne vas pas sans quelques inconvénients : le lecteur qui parcourra le rapport *in extenso* y trouvera parfois quelques redites. On ne peut pas tout avoir. Merci de votre compréhension !

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE I

Chapitre 1

Un abécédaire du cerveau

La connaissance est le seul bien; l'ignorance est le seul mal.

Socrate

Ne pas savoir est mauvais. Ne pas vouloir savoir est pire.

(Proverbe africain)

Ce chapitre offre un « abécédaire du cerveau ». Les contenus du présent rapport, détaillés dans les chapitres suivants, sont ici résumés et présentés en ordre alphabétique sous formes de mots et concepts clés. On part donc de **A***pprentissage et* **B***ases neurales…, pour terminer avec* **V***ariabilité,* **W** *comme « travail » et* **XYZ**. *Le lecteur peut choisir les entrées qui l'intéressent particulièrement, et se référer directement aux points correspondants, dans les chapitres qui offrent un spectre à la fois plus large et plus précis des thèmes ici abordés. Ce chapitre est pertinent pour toutes celles et tous ceux qui sont attirés par le carrefour entre « sciences de l'aprentissage et recherche sur le cerveau » – qu'ils soient apprenants, parents, enseignants, chercheurs ou décideurs poltiques.*

Apprentissage

L'approche neuroscientifique du phénomène d'apprentissage offre un cadre théorique scientifique dans lequel peuvent s'inscrire les pratiques éducatives. Ce champ en pleine émergence pose, au fur et à mesure, les bases de la « science de l'apprentissage ».

Un être vivant est constitué d'un grand nombre de niveaux d'organisation. En conséquence, un même processus peut se définir différemment en fonction du niveau auquel on se place. C'est le cas du processus d'apprentissage, dont la définition varie selon la perspective de celui qui le décrit.

Du cellulaire au comportemental, la divergence des définitions rend compte du contraste entre les neurosciences et les sciences de l'éducation. Pour les neuroscientifiques, l'apprentissage est un processus cérébral en réaction à un stimulus, alliant perception, traitement et intégration de l'information. Pour les éducateurs, il s'agit d'un processus actif conduisant à l'acquisition de connaissances et entraînant un changement de comportement persistant, mesurable et spécifique.

Bases neurales du phénomène d'apprentissage

La définition de l'apprentissage validée par les neuroscientifiques lie ce processus à un substrat biologique. L'apprentissage, de ce point de vue, résulte de l'intégration de toutes les informations perçues et traitées. Cette intégration est alors matérialisée par des modifications structurelles au sein du cerveau : des changements microscopiques ont lieu, qui permettent à chaque information traitée de laisser une « trace » physique de son passage.

Il apparaît utile, et même nécessaire, aujourd'hui, que les éducateurs (et, de manière générale, tout individu impliqué dans l'éducation) acquièrent des connaissances quant aux bases scientifiques du phénomène d'apprentissage.

Cerveau

Bien que jouant un rôle fondamental, le cerveau demeure partie d'un tout. L'individu n'est pas réductible à cet organe car le cerveau est en constante interaction avec le reste du corps.

Le cerveau est l'organe siège des facultés mentales. Il assure, à la fois, les fonctions vitales en contrôlant le rythme cardiaque, la température corporelle, la respiration, etc., et les fonctions dites « supérieures » telles que le langage, le raisonnement ou encore la conscience.

Cet organe comprend deux hémisphères (gauche et droit) dont la surface se divise pour chacun en lobes (occipital, pariétal, temporal et frontal) – voir une description plus complète dans le chapitre 2.

Les principaux composants du tissu cérébral sont les cellules gliales et nerveuses (neurones). Le neurone est considéré comme l'unité fonctionnelle de base du cerveau, qualité conférée par son importante interconnectivité et sa spécialisation en matière de communication. Les neurones sont organisés en réseaux fonctionnels localisés dans différentes aires du cerveau.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Développement

Le cerveau évolue – se développe – tout au long de la vie. Ce développement dépend à la fois de la biologie et de l'expérience (voir chapitre 2). Les tendances génétiques interagissent avec l'expérience pour déterminer la structure et le fonctionnement du cerveau à tout moment. En raison de cette interaction permanente, chaque cerveau est unique.

Même s'il existe un large spectre de différences individuelles dans le développement cérébral, le cerveau possède des caractéristiques en lien avec l'âge qui peuvent avoir d'importantes conséquences pour l'apprentissage. Les scientifiques commencent à cartographier ces changements liés à la maturation, et à comprendre comment la biologie et l'expérience interagissent pour guider le développement.

Comprendre le développement cérébral d'un point de vue scientifique pourrait avoir d'importantes conséquences sur les pratiques éducatives. Au fur et à mesure que la science découvre les changements cérébraux liés à l'âge, les éducateurs seront en mesure d'utiliser l'information disponible pour faire significativement évoluer la didactique, de façon à la rendre plus efficace en s'assurant qu'elle entre davantage en résonance avec l'âge des apprenants.

Émotions

Les aspects émotionnels ont longtemps été négligés au sein de l'éducation institutionnelle. Les récents apports neuroscientifiques contribuent à remédier à cette carence, en démontrant la place de la dimension émotionnelle dans les apprentissages (voir chapitre 3).

Les émotions, à dissocier des affects qui ne sont que leur interprétation consciente, relèvent de phénomènes cérébraux et sont nécessaires à l'adaptation et à la régulation du comportement humain.

Ce sont des réactions complexes que l'on décrit généralement suivant trois composantes : un état mental particulier, un changement physiologique et une impulsion à agir. Ainsi, face à une situation perçue comme dangereuse, les réactions engendrées par cette situation seront simultanément : une activation cérébrale spécifique du circuit dévolu à la peur, l'expression corporelle de la peur traduite par l'accélération du pouls, la pâleur et la sudation, et une réaction de défense ou de fuite (« fight or flight »).

Chaque émotion correspond à une unité fonctionnelle distincte et possède son propre circuit cérébral, impliquant des structures appartenant à ce qu'on appelle le système limbique (également appelé « siège des émotions »), mais aussi des structures corticales, plus particulièrement le cortex préfrontal qui joue un rôle capital dans la régulation des émotions. La maturation du cortex préfrontal intervient d'ailleurs de façon particulièrement tardive dans le développement humain, puisque celle-ci ne prend fin qu'au cours de la troisième décennie de la vie. L'adolescence cérébrale dure ainsi plus longtemps qu'on ne l'avait cru jusqu'à une époque très récente. Ce phénomène contribue donc à expliquer certains comportements : le cortex préfrontal ne peut compenser que tardivement, dans la vie d'un individu, les errements potentiels du système limbique et ainsi remplir pleinement son rôle de régulateur des émotions.

Un échange permanent rend indissociables les aspects physiologique, émotionnel et cognitif d'un comportement. La force de ces liens explique l'incidence majeure qu'ont les émotions sur les apprentissages. Une émotion perçue comme positive, associée à un apprentissage, facilitera la réussite, tandis qu'une émotion perçue comme négative pourra induire l'échec.

Fonctions cognitives

Étudiées à différents niveaux, les fonctions cognitives bénéficient de la richesse d'un éclairage pluridisciplinaire. Ainsi, les neurosciences, la neuroscience cognitive et la psychologie cognitive cherchent-elles, de façon complémentaire, à comprendre ces processus.

La cognition se définit comme l'ensemble des processus qui permettent le traitement de l'information et la constitution des connaissances. Ces processus sont appelés « fonctions cognitives ». Parmi elles, les fonctions cognitives supérieures correspondent aux processus les plus élaborés assurés par le cerveau humain. Elles ont émergé lors de la phase la plus récente de l'évolution du cerveau et ont leur siège principal dans le cortex, structure particulièrement développée chez l'être humain (voir chapitre 2).

Parmi ces fonctions, on peut citer certains aspects de la perception, la mémoire, l'apprentissage mais aussi le langage, le raisonnement, la planification et la prise de décision.

Génétique

On croit encore bien souvent à un lien causal simple entre génétique et comportement. Imaginer une relation linéaire entre facteurs génétiques et comportements peut conduire à la dérive du déterminisme à outrance. Un gène n'est pas un activateur de comportement : il ne s'agit que d'une séquence d'ADN contenant les informations nécessaires à la production d'une protéine. L'expression du gène est variable et dépend de nombreux facteurs, notamment environnementaux. La protéine, une fois synthétisée au sein d'une cellule, y occupe une place précise et joue un rôle dans son fonctionnement. On peut alors dire que les gènes affectent le fonctionnement, et par conséquent, modulent le comportement. Mais cette relation non linéaire est complexe et les différents niveaux d'organisation s'influencent mutuellement.

Au fur et à mesure des avancées de la recherche, la frontière entre inné et acquis s'estompe, et ce mythe en déconstruction laisse place à la relation indissociable qu'entretiennent facteurs génétiques et environnementaux dans le développement cérébral.

Prédire des comportements sur une base génétique serait incomplet. Ainsi, toute approche s'appuyant exclusivement sur la génétique se révèle-t-elle non seulement scientifiquement infondée, mais de plus éthiquement contestable… et politiquement dangereuse.

Habiletés (« Skills »)

Le terme « skills » est très fréquemment employé en anglais lorsqu'on évoque les comportements et les apprentissages[1]. Un comportement se décompose en termes d'habiletés qui peuvent alors être définies comme les « unités naturelles » du comportement.

Le langage peut, par exemple, se diviser en quatre « méta-habiletés » suivant la direction et le mode de communication : compréhension orale, production orale, lecture et écriture. Mais chacune de ces « méta-habiletés » se décompose à son tour en habiletés distinctes. La compréhension orale, par exemple, comprend une dizaine d'habiletés parmi lesquelles la mémorisation à court terme des séquences sonores, la discrimination des sonorités distinctives de la langue, la distinction des mots, ou encore l'identification des classes grammaticales.

1. Pourtant, il ne possède aucune traduction littérale en français. On lui substitue, suivant le cas, « compétence », « aptitude », « capacité » ou « habileté ». Le terme d'habileté dans le sens de la capacité d'un individu à atteindre un but donné semble le plus à même de représenter la notion véhiculée par « skill » (à ne pas confondre avec le sens commun de « qualité de celui qui est habile »). L'habileté se définit donc comme une capacité à faire quelque chose de spécifique.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Chaque habileté correspond à une classe d'activités spécifique. Cela soulève les questions de l'évaluation des acquis et de la distinction qui pourrait être faite entre habileté et connaissance. Qu'attend-on des enfants? Des connaissances ou la maîtrise d'habiletés? Que veut-on « mesurer » lors d'évaluations?

Intelligence

La notion d'intelligence est depuis toujours sujette à controverse. Un seul concept permet-il d'englober toutes les facultés intellectuelles d'un individu? Ces facultés sont-elles dissociables et mesurables? Surtout, qu'indiquent-elles et que prédisent-elles du fonctionnement cérébral d'un individu et de son comportement social?

Lorsqu'on parle d'intelligence, on évoque une aptitude. Aptitude verbale, aptitude spatiale, aptitude à résoudre des problèmes ou même l'aptitude (très élaborée) à affronter la complexité. Mais tous ces aspects négligent la notion de potentiel. Pourtant, l'éclairage neurobiologique sur les apprentissages et les fonctions cognitives indique clairement que ces processus sont soumis à une évolution constante et sont dépendants de multiples facteurs, notamment environnementaux et émotionnels. Ainsi, un environnement stimulant devrait offrir à chacun la possibilité de développer des habiletés et donc d'évoluer.

Les multiples tentatives de quantification de l'intelligence, par le biais de tests (mesure du QI ou autres) semblent, dans cette perspective, offrir un constat trop statique mais surtout renvoient à des facultés standardisées et culturellement (voire idéologiquement) biaisées.

Reposant sur des postulats a priori, *les tests d'intelligence apparaissent comme trop restrictifs et donc problématiques. Que dire alors de pratiques ou même de choix d'orientations fondés sur de fumeux « calculs d'intelligence » ou sur des appartenances à de contestables « niveaux d'intelligence » ?*

J'entends, j'oublie. Je vois, je me souviens. Je fais, je comprends. [Confucius]

Longtemps oubliée par les éducateurs, cette citation retrouve sa place au cours du XXe siècle avec l'avènement du constructivisme. Opposé aux théories centrées sur l'enseignant expert qui transmet un savoir, ce courant défend une nouvelle conception de l'apprentissage : la construction des connaissances. L'apprentissage est centré sur l'apprenant et repose sur l'évolution de connaissances antérieures, en fonction de l'expérience, des envies et des besoins de chacun.

Ces bouleversements théoriques donnent ainsi naissance aux pratiques dites actives ou expérientielles de l'apprentissage par l'action. On recherche une implication active de la part de l'apprenant qui interagit avec son environnement matériel et humain, en se fondant sur l'idée que l'action entraîne un niveau d'intégration de l'information plus profond que la perception. En effet, dans l'action, il y a nécessairement opérationnalisation, c'est-à-dire mise en application de concepts. L'apprenant doit non seulement acquérir des savoirs et des savoir-faire mais aussi pouvoir les opérationnaliser dans le cadre de situations concrètes. L'apprenant se retrouve donc actif et son apprentissage en est d'autant plus performant.

Certaines découvertes neuroscientifiques n'apportent pas d'éléments innovants en termes d'applications didactiques, mais elles offrent une base théorique solide aux pratiques éprouvées et consolidées par l'expérience. Ces éléments scientifiques permettent d'étoffer les connaissances empiriques ou intuitives accumulées, et d'expliquer les réussites ou les échecs de certaines pratiques.

Kafka

Franz Kafka, dans « Le Château », en décrivant les vains efforts du protagoniste pour atteindre ses objectifs (« Il existe bien un but, mais pas de chemin vers ce but » : « Es gibt zwar ein Ziel, aber keinen Weg zum Ziel ») nous dit tout le désespoir que peut ressentir l'individu face à une machine bureaucratique sourde et aveugle. Dino Buzzati, dans « Le K », en mettant en scène la tragédie d'un malentendu, nous dit à quel point il peut être triste, mais aussi dangereux, de comprendre certaines réalités trop tard…

Les résistances à la prise en compte des découvertes neuroscientifiques dans la réflexion sur les politiques et les pratiques éducatives ne manquent pas, et sont de nature à décourager les meilleures volontés. Qu'il s'agisse de simples incompréhensions, d'inerties mentales diverses et variées, du refus catégorique de remettre en cause certaines « vérités », de réflexes corporatistes de défense des positions acquises, ou de lourdeur bureaucratique, les obstacles qui se dressent devant tout effort transdisciplinaire visant à l'émergence d'un nouveau champ, ou visant plus modestement à jeter une lumière nouvelle sur les questions éducatives, ne manquent pas. En d'autres termes, de délicats problèmes de « gestion des connaissances » se posent ici. Si un scepticisme constructif de bon aloi ne peut certes jamais nuire, tout projet innovateur se trouve à un moment dans la position de « K » cherchant à atteindre le Château. De telles difficultés ne doivent cependant pas faire baisser les bras. Et comme le disait Lao-Tseu : « le chemin, c'est le but »…

Par ailleurs, les neurosciences fournissent, à leur corps défendant, la matière nécessaire au développement de nombreux « neuromythes » fondés sur les malentendus, les mauvaises interprétations, voire les distorsions des résultats de la recherche. Ces neuromythes, savamment entretenus dans l'esprit du public par les médias, méritent d'être démasqués, explicités au citoyen et dissipés. De surcroît, les neurosciences sont porteuses de nombreuses questions éthiques qui, dans des sociétés démocratiques, ne peuvent être traitées que par le débat politique.

On peut se demander s'il serait acceptable dans toute réflexion éducative (au plus tard à moyen terme) de ne pas tenir compte de ce que l'on sait aujourd'hui du fonctionnement cérébral. Est-il éthiquement acceptable d'ignorer un champ de recherche pertinent et original capable d'éclairer d'une nouvelle lumière les débats éducatifs ?

Langage

Le langage est une fonction cognitive spécifiquement humaine et dédiée entre autres à la communication. Il permet la mise en œuvre d'un système de symboles. Un nombre fini de symboles arbitraires, dotés d'une sémantique, peut se combiner suivant des règles syntaxiques, et générer ainsi une infinité d'énoncés. Un tel système sera alors considéré comme une langue. Les différentes langues emploient des phonèmes, des graphèmes, des gestes et d'autres symboles pour représenter des objets, des concepts, des émotions, des idées et des pensées.

L'expression de la fonction langagière met en relation au moins un locuteur avec un destinataire, ceux-ci étant interchangeables. Le langage peut donc se décomposer suivant une direction (perception ou production) mais aussi suivant une modalité (orale ou écrite). L'apprentissage du langage oral se fait naturellement durant l'enfance par simple exposition. Le langage écrit nécessite, lui, une instruction intentionnelle (voir chapitre 4).

Le langage est une des premières fonctions dont les bases cérébrales ont été mises en évidence. Ainsi au XIXe siècle, deux chercheurs (Broca et Wernicke) ont démontré

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

l'implication de certaines zones cérébrales dans les processus langagiers en étudiant des patients aphasiques. Depuis, de nombreuses études confirment que les aires de Broca et de Wernicke appartiennent bien au circuit cérébral dévolu au langage (voir chapitre 4).

L'intérêt premier des neurosciences pour le langage a permis d'accumuler de nombreuses connaissances sur cette fonction. La compréhension des mécanismes langagiers et de leur apprentissage a déjà, à l'heure actuelle, un impact fort sur les politiques éducatives.

Mémoire

Lors d'un apprentissage, une trace est laissée par le traitement et l'intégration des informations perçues. Cette trace active la mémoire. Elle correspond au processus cognitif permettant de se souvenir d'expériences passées, ce qui comprend aussi bien la phase d'acquisition (phase de constitution de la trace) que la phase de remémoration de l'information (réactivation de cette trace). Plus une trace est réactivée, plus elle sera « marquée ». Elle sera alors moins vulnérable et moins sujette à l'oubli.

La mémoire est construite par les apprentissages, et ceux-ci persistent grâce à elle. Ces deux processus entretiennent un lien si profond que la mémoire est soumise aux mêmes facteurs d'influence que les apprentissages. Ainsi la mémorisation d'un événement ou d'une information est-elle susceptible d'être améliorée par un état émotionnel fort, un contexte remarquable, la motivation et l'attention portée par l'individu à ce qui doit être mémorisé.

Apprendre une leçon revient souvent à savoir la réciter. Les apprentissages et leur évaluation reposent généralement sur la restitution, et donc sur la mémorisation d'informations, au détriment de la maîtrise d'habiletés ou même de la compréhension. La place accordée aux compétences de mémorisation dans les apprentissages est-elle justifiée? Cette question, centrale quant aux problématiques éducatives, commence à susciter l'intérêt des neuroscientifiques.

Neurone

Organisés en réseaux fortement interconnectés, les neurones ont des propriétés électriques et chimiques leur permettant de propager un influx nerveux (voir chapitre 2, particulièrement le graphique 2.1). Un potentiel électrique est véhiculé au sein de la cellule et un processus chimique transmet de l'information d'une cellule à une autre. Ces cellules nerveuses sont donc spécialisées dans la communication.

La propagation électrique interne à la cellule est unidirectionnelle. Des « inputs » sont reçus par le neurone au niveau de ses dendrites ou de son corps cellulaire. En réponse à ces « inputs », le neurone génère des potentiels d'action. La fréquence de ces potentiels est variable et fonction des « inputs ». Les potentiels d'action se propagent alors le long de l'axone.

Une zone appelée synapse sert de jonction entre deux neurones. La synapse est composée de trois éléments : la terminaison, la fente synaptique et la dendrite du neurone post-synaptique. Lorsque les potentiels d'action atteignent la synapse, ils provoquent la libération d'une substance chimique, le neurotransmetteur, qui traverse la fente synaptique. Cette activité chimique est modulable en fonction du type et de la quantité du neurotransmetteur mais aussi du nombre de récepteurs impliqués. La quantité de neurotransmetteurs libérés et le nombre de récepteurs impliqués répondent à l'expérience : c'est la base cellulaire de la plasticité (voir ci-dessous). L'effet sur le neurone post-synaptique peut être de nature excitatrice ou inhibitrice.

La combinaison des activités électriques et chimiques des neurones permet donc de transmettre et de moduler des informations au sein des réseaux formés par ces cellules.

Pour mieux comprendre le fonctionnement cérébral, les différentes techniques d'imagerie fonctionnelle (IRMf, MEG, TEP, TO, etc.) (voir annexe B) sont utilisées pour visualiser et étudier l'activité des changements de circulation sanguine induits par l'activité neuronale.

Les études portant sur la localisation des réseaux cérébraux ouvrent une grande porte vers la compréhension des mécanismes d'apprentissage. Plus les techniques d'imagerie gagnent en résolution spatiale et temporelle, plus les études sur la localisation sont précises, permettant ainsi une meilleure compréhension du fonctionnement cérébral.

Opportunité (fenêtres d')

Au cours du développement d'un individu, certaines périodes sont particulièrement propices à l'apprentissage de certaines habiletés. Lors de ces moments clés, le cerveau a besoin de certains types de stimulations pour établir et stabiliser à long terme le développement des structures concernées. L'expérience de l'individu devient alors primordiale et engendre de profonds changements.

De telles périodes sont désignées sous le nom de « périodes sensibles » ou fenêtres d'opportunité, car elles constituent pour les individus la période optimale pour un apprentissage donné. Elles sont la conséquence du développement naturel mais nécessitent de l'expérience pour qu'un changement (l'apprentissage) puisse être efficient. On parle alors d'« apprentissage attendant de recevoir de l'expérience », comme par exemple pour le langage oral (voir chapitre 4), en opposition à l'« apprentissage dépendant de l'expérience » qui peut, lui, se dérouler à tout moment de la vie. C'est le cas de l'apprentissage du langage écrit.

Un apprentissage qui n'a pas eu lieu durant cette fenêtre d'opportunité n'est pas pour autant perdu. Il reste possible tout au long de la vie, mais en dehors de ces fenêtres d'opportunité, il sera plus coûteux en temps et en ressources cognitives, et son efficacité sera souvent moindre.

Une meilleure connaissance des périodes sensibles et des apprentissages qui leur sont associés est un objectif crucial pour la recherche dans les années à venir. Une cartographie de plus en plus complète permettra de développer les programmes éducatifs pour faire entrer en meilleure concordance acquisitions et périodes sensibles. L'efficacité des apprentissages ne pourra qu'en être améliorée.

Plasticité

Le cerveau est capable d'apprendre parce qu'il est flexible (voir chapitre 2). Il « change » en réaction aux stimulations de l'environnement. Cette flexibilité repose sur une de ses propriétés intrinsèques : la plasticité.

Ce mécanisme opère au niveau des connexions synaptiques de différentes façons (voir chapitre 2, graphique 2.1). Certaines synapses peuvent être générées (synaptogenèse), d'autres supprimées (élagage ou « pruning »), leur efficacité peut être modulée, etc., en fonction des informations traitées et intégrées par le cerveau.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Les « traces » laissées par les apprentissages et la mémorisation sont le fruit de ces modifications. La plasticité est donc une condition nécessaire aux apprentissages, et demeure, en tant que propriété inhérente du cerveau, opérante tout au long de la vie.

La notion de plasticité et ses implications sont particulièrement importantes. Les enseignants, les décideurs politiques et tous les apprenants gagneront à comprendre pourquoi les apprentissages sont possibles tout au long de la vie. La plasticité cérébrale est un argument majeur en faveur de l'« apprentissage tout au long de la vie ». Ne devrait-on pas, dès l'école primaire, enseigner aux enfants comment et pourquoi ils sont capable d'apprendre?

Qualité, hygiène de vie

Le cerveau, comme tout organe du corps, peut voir son fonctionnement optimisé par une bonne hygiène de vie. De récents travaux se sont intéressés à l'incidence que pouvaient avoir l'alimentation ou une activité physique sur les facultés cérébrales, notamment sur l'apprentissage, et sur la prévention de certains troubles du comportement ou des apprentissages (voir chapitre 3). De même, une activité sportive régulière a un effet bénéfique sur le fonctionnement cognitif humain en modifiant l'activité de certaines régions cérébrales.

Le rôle du sommeil est également des plus déterminants (chapitres 3 et 6). Qui n'a pas fait l'expérience d'un déficit de sommeil et s'est alors aperçu que le fonctionnement cognitif en est la première victime? C'est en effet durant le sommeil que se déroulent certains processus impliqués dans la plasticité et la consolidation des connaissances, des processus par conséquent déterminants pour la mémorisation et les apprentissages.

Les facteurs environnementaux (bruits, aération, etc.) et physiologiques (alimentation, activités physiques, sommeil, etc.) ont une incidence sur les apprentissages. Les découvertes dans ce domaine devraient conduire, à court terme, à des applications concrètes en termes de pratiques scolaires et périscolaires.

Représentations

L'être humain perçoit, traite et intègre de l'information en permanence. Il apprend. Les représentations de chaque individu lui sont propres, et se sont construites au fur et à mesure de son expérience. Constituées en système, elles traduisent le monde tel que l'individu le perçoit. Elles régissent alors la pensée.

Depuis la Caverne de Platon au moins, la question des représentations est du ressort de la philosophie. Bien entendu, il n'est pas question ici de prétendre répondre aux questions éternelles de l'humanité, mais il n'est pas exclu qu'un jour, notre connaissance du fonctionnement cérébral soit telle qu'elle apporte de nouveaux éléments aux controverses philosophiques les plus profondes.

Sociales (interactions)

Les interactions sociales agissent tel un catalyseur des apprentissages. Sans interaction, un individu ne peut ni apprendre, ni même se développer correctement. Face à un contexte social, ses apprentissages seront d'autant plus performants que ce contexte sera riche et varié.

C'est en effet à partir de la découverte que s'amorcent les processus d'appropriation et de construction de connaissances ou d'habiletés, et de la confrontation avec autrui que se développent les stratégies et s'affine le raisonnement. Les interactions sociales sont donc

une condition constituante, tant pour le développement précoce des structures cérébrales que pour l'évolution normale des fonctions cognitives (voir chapitre 3).

Quelle place laisse-t-on aux interactions entre apprenants au sein de l'éducation institutionnelle? L'apparition des nouvelles technologies dans le secteur de l'éducation a engendré un bouleversement des interactions en situation d'apprentissage. Quel impact peut avoir cette modification sur les apprentissages?

Toutes ces problématiques sont abordées par une discipline en pleine émergence, la neuroscience sociale, qui traite des processus et comportements sociaux.

Tu me dis, j'oublie, Tu m'enseignes, je me souviens, Tu m'impliques, j'apprends. [Benjamin Franklin]

Cet aphorisme restitue à l'implication sa place de condition essentielle à un apprentissage significatif. L'implication traduit l'engagement d'un individu au sein d'une action et, en ce sens, résulte directement de la motivation qui se définit comme le processus incitant un individu à adopter un comportement, à poursuivre un objectif. Ce processus peut être déclenché par des facteurs internes ou externes. On parle alors de motivation intrinsèque, qui ne dépend que des besoins et envies propres à l'apprenant, ou extrinsèque, qui prend en compte les influences subies. La motivation est largement conditionnée par l'assurance, l'estime de soi et le bénéfice escompté par un individu face à un comportement ou un but visé.

Ensemble, motivation et estime de soi sont essentielles à la réussite d'un apprentissage. Afin de restituer à ces facteurs leur place au sein des structures d'apprentissage, le système du tutorat devient de plus en plus présent. Il offre à l'apprenant un suivi individualisé et ainsi mieux adapté à ses besoins. Un climat d'apprentissage plus personnel devrait alors aider à éveiller la motivation des apprenants, sans oublier le rôle crucial des interactions sociales dans tout processus d'apprentissage. La personnalisation ne doit pas conduire à l'isolation des apprenants.

La motivation joue un rôle primordial dans la réussite des apprentissages, notamment la motivation intrinsèque. Tout individu apprend d'autant plus facilement qu'il le fait pour lui-même, avec l'envie de comprendre.

Bien qu'il soit difficile, à l'heure actuelle, d'imaginer une approche éducative ciblant plus cette motivation intrinsèque que celle centrée sur des systèmes de punitions/récompenses (« la carotte et le bâton »), le bénéfice d'une telle approche serait tel qu'il est primordial que la recherche s'oriente vers ce domaine.

Universalité

De nombreux invariants caractérisent l'espèce humaine. Le développement du cerveau figure parmi ces invariants. Il suit un programme inscrit dans le patrimoine génétique de chaque individu, et est rythmé par un « ballet » d'expression de gènes parfaitement réglé et nourri en permanence par l'expérience.

Le cerveau est plastique (voir chapitre 2). C'est une propriété intrinsèque. En permanence, il perçoit, traite et intègre de l'information provenant de l'expérience individuelle, et subit alors des changements de connectivité au sein de ses réseaux de neurones. Cette évolution constante est le fruit de son fonctionnement normal, et implique une capacité d'apprentissage permanente. Cette propriété universelle a pour corollaire le fait que l'être humain peut apprendre, et que son cerveau veut apprendre, tout au long de la vie.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

« Toute personne a droit à l'éducation » (Déclaration universelle des droits de l'homme, Nations Unies, 10 décembre 1948, article XXVI). L'éducation régule les apprentissages pour que tous aient accès aux fondamentaux que sont la lecture, l'écriture et le calcul (voir chapitres 4 et 5).

Des évaluations internationales tentent de vérifier l'égalité et la solidité des différents systèmes éducatifs. Bien qu'il soit difficile de « mesurer » les acquis au travers des différences culturelles, elles permettent une prise de conscience du besoin permanent de faire progresser l'éducation.

Variabilité

L'expérience, qui joue un rôle fondamental dans le développement et la construction individuelle, est propre à chacun et subjective. Les représentations, résultant de l'expérience, sont donc différentes d'un individu à l'autre. L'expérience participe aussi à la construction de styles d'apprentissage préférentiels, qui amènent l'apprenant à employer des stratégies d'apprentissage particulières suivant les situations.

Lors d'apprentissages spécifiques s'opèrent des changements, des passages d'un état à un autre. Or, la diversité des expériences individuelles et des représentations implique des états initiaux différents pour chacun. De plus, les modifications résultant de l'apprentissage varient suivant les motivations, interactions et stratégies d'apprentissage. Ainsi, l'incidence d'un apprentissage diffère-t-il d'un individu à l'autre. On parle alors de variabilité.

Les élèves d'une même classe qui suivent un même cours n'apprendront donc pas la même chose. Leurs représentations des notions abordées seront différentes car ils ne disposent pas à la base des mêmes acquis et ne partagent pas non plus le même style d'apprentissage. Ils ne feront donc pas évoluer leurs représentations de la même façon. Ils garderont tous une trace de cet apprentissage, mais cette trace sera différente et spécifique pour chaque individu.

Pour ne pas ignorer ces différences, les apprentissages doivent de plus en plus les intégrer. La diversification des contenus, visant à une plus grande personalisation, est un objectif de plus en plus important pour l'éducation.

La question sur les différences corticales entre hommes et femmes est fréquemment soulevée. Pourtant aucun élément neuroscientifique ne permet de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

W comme « travail »

Un travail colossal a été accompli ces dernières années pour faire émerger la neuroscience de l'éducation, qui à son tour contribue à la naissance d'une science de l'apprentissage plus vaste et plus transdisciplinaire (voir chapitre 7). Mais les efforts passés ne sont rien en comparaison de ce qui attend ceux qui nous suivront sur ce terrain. On peut souhaiter qu'ils rencontrent dorénavant moins de résistances, d'autant qu'ils auront à traiter une masse d'information beaucoup plus grande encore. Car il se trouve que…

… XYZ

… l'histoire est loin d'être finie. Ce travail du CERI n'est que le début d'une aventure. Il appartient maintenant à d'autres de s'engager sur cette route. Beaucoup l'ont déjà entrepris (voir chapitre 7). Gageons qu'il reste beaucoup plus que trois lettres à écrire à propos de notre alphabet cérébral. Notre connaissance du cerveau humain est à l'image du cerveau lui-même : en perpétuelle évolution…

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE I

Chapitre 2

Comment le cerveau apprend tout au long de la vie

Mon cerveau? C'est mon second organe par ordre de préférence.

Woody Allen

Ce chapitre présente une description accessible de l'architecture cérébrale. Il montre comment le cerveau apprend tout au long de la vie, en se concentrant sur trois phases essentielles : la petite enfance, l'adolescence, et l'âge adulte (y compris l'âge mûr). On y verra aussi comment les déclins cognitifs et les dysfonctionnements associés au grand âge peuvent être combattus et retardés par des apprentissages. Ce chapitre sera particulièrement utile aux lecteurs peu familiers des travaux neuroscientifiques sur le cerveau, les principes de base et les analyses qui en découlent s'adressant ici aux non-spécialistes, à l'aide entre autres de graphiques et de tableaux.

L'apprentissage est un processus très complexe, dont les définitions changent selon les auteurs et dépendent du contexte et des perspectives envisagées. Elles sont très différentes pour les neuroscientifiques et les spécialistes des sciences de l'éducation, ce qui complique parfois le dialogue entre les deux communautés. Ainsi, d'un point de vue neuroscientifique, Koizumi (2003) définit-il l'apprentissage comme « le processus par lequel le cerveau réagit aux stimuli en créant des connexions neurales qui servent de circuit de traitement de l'information et permettent le stockage d'information ». Pour Coffield (2005) et les sciences de l'éducation, en revanche, l'apprentissage correspond à « des changements significatifs dans les capacités, la compréhension, les attitudes ou les valeurs chez des individus, des groupes, des organisations ou des sociétés »; pour lui, « l'acquisition d'informations nouvelles, quand elle ne débouche par sur de tels changements », n'est pas un apprentissage.

Le but de ce chapitre n'est pas de fournir une définition générale de l'apprentissage, ni de répertorier les différentes définitions qui en ont été données. Il s'agit plutôt, en tenant compte des très nombreuses acceptions du terme selon les contextes, de présenter les principes fondamentaux de l'architecture cérébrale et d'expliquer comment l'information est traitée aux différentes étapes de la vie. Nous étudierons également les façons de remédier au déclin de fonctions cérébrales plus ou moins endommagées par le vieillissement ou la maladie.

Le développement de nouvelles techniques d'imagerie cérébrale (voir annexe B) a permis l'émergence de la neuroscience cognitive[1]. Les neuroscientifiques accordent de plus en plus d'attention à l'apprentissage comme champ d'application des nouvelles découvertes scientifiques et en tant que source de questions importantes pour la recherche. Un certain nombre d'études menées en neuroscience sont très pertinentes pour la conception des programmes, les pratiques éducatives et les styles d'apprentissage en littératie et numératie. La neuroscience cognitive peut aussi éclairer le rôle de l'apprentissage à l'âge adulte dans le traitement de problèmes liés au vieillissement (comme les pertes de mémoire) ou de maladies chroniques plus grave comme la démence sénile (maladie d'Alzheimer)[2]. Ce que la neuroscience cognitive est en train de découvrir à propos de l'apprentissage tout au long de la vie sert de base aux analyses présentées ici.

1. La neuroscience cognitive étudie les mécanismes neuronaux qui sous-tendent la cognition. Elle recoupe en partie la neuroscience, qui étudie le cerveau de manière plus générale, et la psychologie cognitive, qui s'intéresse aux substrats neuraux des processus mentaux et aux manifestations comportementales de ces derniers.
2. La démence résulte d'une maladie organique ou d'un dysfonctionnement cérébral (voir ci-dessous) et entraîne la détérioration de certaines facultés mentales telles que la mémoire, la concentration et le jugement.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

L'architecture du cerveau : les bases

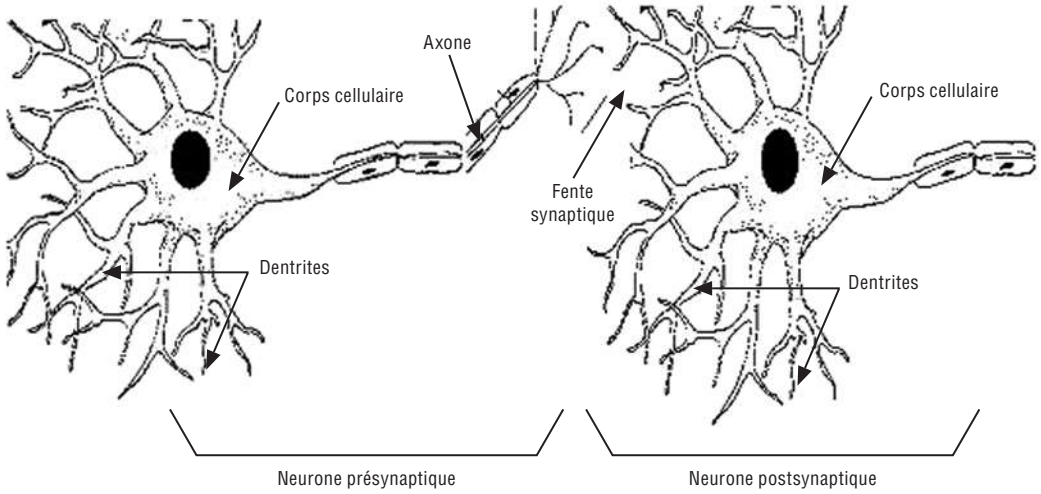
Le cerveau est un ensemble de neurones et de cellules gliales[3], qui en sont les composants élémentaires. Au plus fort du développement cérébral prénatal (entre 10 et 26 semaines après la conception), il se crée environ 250 000 neurones par minute. À la naissance, le nombre de neurones déjà constitués est de 15 à 32 milliards – une grande partie de ceux qui existeront plus tard. Une telle fourchette montre clairement que le décompte est imprécis, mais aussi que le nombre de cellules varie considérablement selon les individus. Après la naissance, les connexions interneuronales continuent à considérablement évoluer : de nouvelles connexions se forment, d'autres se renforcent, d'autres encore s'affaiblissent, d'autres enfin disparaissent. La capacité du cerveau à apprendre n'est pas liée seulement au nombre de neurones, mais à la densité des connexions entre eux. Les possibilités de modifications sont immenses, étant donné que chaque neurone est souvent connecté à plusieurs milliers d'autres. On a longtemps pensé que ces modifications avaient surtout lieu durant l'enfance, car à l'âge de six ans le cerveau atteint déjà 90 % de sa taille adulte. Aujourd'hui, la recherche montre que le cerveau connaît des changements significatifs tout au long de la vie.

Les processus mémoriels et d'apprentissage sont inscrits dans les réseaux interconnectés de neurones. Chaque neurone présente trois parties distinctes : un corps cellulaire, des dendrites, et un axone (voir le graphique 2.1). Les dendrites sont des filaments hautement ramifiés qui reçoivent des signaux chimiques en provenance d'autres neurones. Tandis que les dendrites reçoivent des stimuli en provenance d'autres neurones, l'axone envoie des stimuli vers d'autres neurones. Le corps cellulaire contient le noyau, porteur de l'ADN, où se produit l'essentiel de la synthèse des protéines. Des signaux électriques traversent la cellule et se propagent le long de l'axone, long filament émanant du corps cellulaire et recouvert d'une couche de graisse, la myéline. Un neurone communique avec un autre neurone en libérant par son axone (qui peut avoir plusieurs terminaux) une substance chimique (un neurotransmetteur). Le neurone émetteur est qualifié de « présynaptique » et le neurone récepteur de « postsynaptique ». Il existe en effet entre l'axone du neurone présynaptique et les dendrites du neurone postsynaptique un petit espace, la fente synaptique (ou plus simplement synapse). En fait, les terminaux des axones de nombreux neurones présynaptiques convergent vers les dendrites de chaque neurone postsynaptique. Ainsi, l'action combinée de nombreux neurones présynaptiques déterminent l'effet produit sur chaque neurone postsynaptique. Le niveau relatif d'activité à chaque synapse régule la puissance de la synapse, la renforçant ou l'affaiblissant plus ou moins. L'existence de la synapse dépend au bout du compte de cette activité. On considère l'ensemble de ces phénomènes comme responsable de l'encodage structurel de la mémoire et de l'apprentissage au niveau cérébral.

La communication entre les neurones est modulée par plusieurs facteurs. Le plus évident est la possibilité d'augmenter le nombre de synapses (*synaptogénèse*). Ce nombre peut également diminuer (*élagage*). D'une façon plus subtile, la « *puissance* » de la communication est régulée selon la quantité de neurotransmetteurs libérés par les terminaux des axones, selon la vitesse avec laquelle les neurotransmetteurs traversent la fente synaptique, ou encore selon le nombre de récepteurs à la surface du neurone postsynaptique. Ces évolutions sont

3. Les cellules gliales sont, avec les neurones, les cellules dont se compose le tissu nerveux. Alors que les neurones transmettent les signaux, les cellules gliales assurent leur nutrition et leur « isolation ».

Graphique 2.1. **Connection synaptique entre deux neurones**



Source : Christina Hinton pour l'OCDE.

souvent qualifiées de renforcement ou d'affaiblissement des connexions synaptiques existantes. À travers ces mécanismes, les réseaux neuronaux sont formés en réponse à l'expérience – le cerveau s'adapte à son environnement.

Les neurones n'évoluent pas seulement *via* les changements synaptiques, mais aussi grâce à la *myélinisation*, processus par lequel une couche de graisse se forme autour de l'axone, jouant le rôle d'« isolant ». Quand deux neurones échangent de l'information, l'axone d'un neurone libère un neurotransmetteur. Pour cela, l'axone doit recevoir un signal : une impulsion électrique venue du corps cellulaire[4]. L'axone se comporte donc comme un fil électrique, qui transmet le courant (l'impulsion électrique) plus rapidement s'il est ainsi « isolé » (ou « myélinisé »). À la naissance, la plupart des axones ne sont pas myélinisés, mais ils le deviennent avec le temps, lorsque des couches de graisse se forment à leur surface. Quand un axone est myélinisé, le courant électrique peut courir entre les couches graisseuses au lieu de se frayer lentement son chemin. Ainsi, les axones myélinisés transmettent-ils l'information jusqu'à 100 fois plus vite que les axones non myélinisés.

Organisation fonctionnelle

Le cerveau est hautement spécialisé. En matière de traitement de l'information, les différentes parties du cerveau accomplissent des tâches différentes. Ce principe de localisation fonctionnelle se vérifie à presque tous les niveaux de l'organisation cérébrale. Chaque partie dédiée à une tâche donnée est constituée de très nombreux neurones interconnectés. Des neurones dédiés à des tâches identiques ou similaires sont connectés les uns aux autres, en groupe; c'est l'un des principes de base. Ces groupes sont eux-

4. Le processus est le suivant. Le neurone A libère un neurotransmetteur dans la fente synaptique entre les neurones A et B. Une certaine quantité de ce neurotransmetteur atteint les récepteurs du neurone B de l'autre côté de la fente. Des pompes s'ouvrent dans la membrane du neurone B afin que les ions présents dans la synapse puissent pénétrer dans la cellule, et que d'autres en sortent. Si l'influence sur le neurone B est suffisamment forte – si les pompes activées sont en nombre suffisant – le voltage de la cellule va changer en entraînant une réaction en chaîne le long de l'axone. C'est ainsi que le signal électrique se propage du corps cellulaire le long de l'axone.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

mêmes connectés à d'autres groupes : une zone donnée du cerveau est ainsi connectée directement ou indirectement à beaucoup d'autres, formant un réseau complexe. Bien des zones du cerveau sont hautement spécialisées et ont des fonctions très spécifiques. Par exemple, certains groupes du cortex visuel traitent la couleur, d'autres groupes distincts traitent le mouvement ou la forme. Pour « voir » un objet, notre cerveau associe les données de plusieurs zones spécialisées qui fournissent chacune un aspect de notre perception. Quand de nombreuses zones cérébrales sont nécessaires à une fonction donnée, on parle de *réseau cognitif*.

Certaines fonctions sont déjà en place à la naissance. C'est par exemple le cas de l'opération qui consiste à segmenter la parole en mots (Simos et Molfese, 1997)[5]. Une étude sur des nouveaux-nés français a montré que ces derniers réagissaient à la prosodie (intonation et rythme d'une langue) de la langue française dès cinq jours après la naissance (voir le chapitre 4). L'apprentissage commence donc dès la gestation (Pena et autres, 2003). D'autres fonctions doivent, elles, être « construites ». La lecture nécessite un réseau complexe qui fait appel à de très nombreuses zones du cerveau. À la naissance, ce réseau n'existe pas. Il doit être formé en connectant et coordonnant les activités de plusieurs zones spécialisées (voir chapitres 4 et 5).

Deux cerveaux ne sont jamais parfaitement identiques. Si tous les êtres humains possèdent la même structure cérébrale de base, on note des différences individuelles significatives en ce qui concerne non seulement la taille globale du cerveau, mais aussi l'importance des réseaux de neurones, en volume comme en structure (organisation et localisation de modules fonctionnels), ainsi que la puissance des connexions cellulaires. Pour commencer, chaque individu possède des caractéristiques génétiques spécifiques, qui induisent de légères différences au niveau cérébral. Puis l'interaction avec l'environnement agit sur cette structure de base, apportant des modifications structurelles dans l'organisation du cerveau, de telle manière que, chez différents individus, pour un processus cognitif donné, différentes expériences peuvent produire des réseaux neuronaux en partie différents.

La structure du cerveau

Le corps humain est symétrique par rapport à un axe vertical (un œil, une main, une jambe à gauche, la même chose à droite). Le cerveau lui aussi est divisé en deux parties principales, *les hémisphères gauche et droit*. L'hémisphère droit contrôle la plupart des actions de la partie gauche du corps, et vice versa. Ainsi, une attaque ayant endommagé l'hémisphère gauche se répercute-t-elle sur la partie droite du corps.

L'hémisphère droit traite principalement les capacités spatiales et la reconnaissance des visages. L'hémisphère gauche, lui, s'occupe plutôt du langage, de mathématiques et de logique. Entre les deux, un ruban de 250 millions de fibres neurales baptisé *corps calleux* sert de passerelle et permet l'échange d'informations. Même si certaines activités dépendent surtout de l'un des deux hémisphères, les deux contribuent à l'activité cérébrale globale. D'ailleurs, le fonctionnement de chaque hémisphère est beaucoup plus complexe qu'on ne le croit souvent, et les deux communiquent par un système de neurotransmetteurs. Il est donc simpliste de dire qu'une personne apprend « en utilisant son cerveau gauche » – ou son cerveau droit (voir chapitre 6).

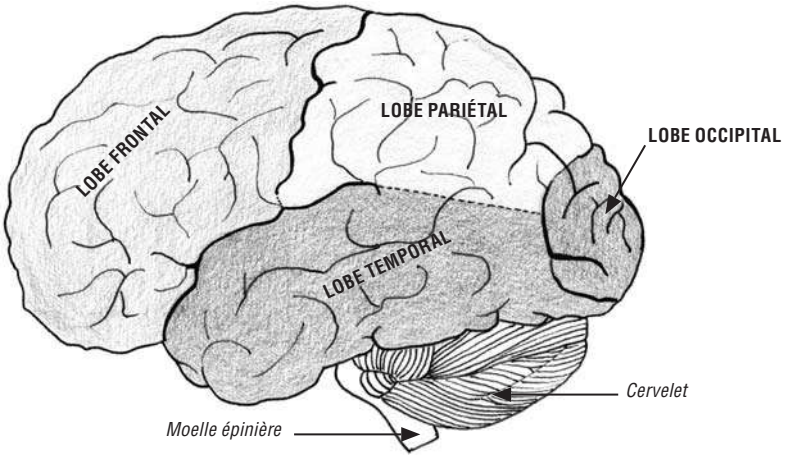
5. Il est souvent très difficile de segmenter un énoncé en mots distincts, puisqu'à l'oral on ne fait pas de pause entre chaque mot.

Dans le *cerebrum*, on trouve le cortex, sorte de couche feuilletée de cellules, principalement constitué de substance grise et de substance blanche[6]. Pour pouvoir se loger à l'intérieur du crâne, le cortex, d'une surface de 2 000 cm^2 et d'une épaisseur de 2 à 4 millimètres, présente de nombreuses circonvolutions, les « collines » (gyrus, *pl.* gyri) et les « vallées » (sulcus, *pl.* sulci). La plupart des neurones du cerveau humain se trouvent dans le cortex, essentiellement dévolu au traitement des fonctions dites supérieures.

Les lobes

Chaque hémisphère est divisé en lobes (voir le graphique 2.2). Toute compétence complexe dépend de l'action coordonnée de plusieurs réseaux neuraux spécialisés, localisés dans différentes parties du cerveau (le résumé qui suit présente l'état actuel des connaissances et pourrait être modifié, à l'avenir, en fonction des avancées de la recherche). Le *lobe frontal* est impliqué dans l'action et la planification. Le *lobe temporal* joue un rôle dans l'audition, la mémoire et la reconnaissance des objets. Le *lobe pariétal* est impliqué dans les sensations et le traitement de l'espace. Le *lobe occipital* est essentiel à la vision. Chaque lobe est subdivisé en réseaux de neurones imbriqués les uns dans les autres, et affectés au traitement d'informations précises[7].

Graphique 2.2. **Principales régions du cortex cérébral**



Source : Odile Pavot pour l'OCDE.

Le lobe frontal comporte quatre circonvolutions principales : le *cortex moteur primaire*, le *gyrus frontal supérieur*, le *gyrus frontal moyen* et le *gyrus frontal inférieur* (voir le graphique 2.3). Le cortex moteur primaire est associé aux mouvements volontaires, le gyrus frontal supérieur à la planification comportementale, le gyrus frontal moyen aux fonctions exécutives supérieures et aux processus de prise de décision. L'*aire de Broca,* dans le gyrus frontal inférieur, est associée à la production langagière, au traitement et à la

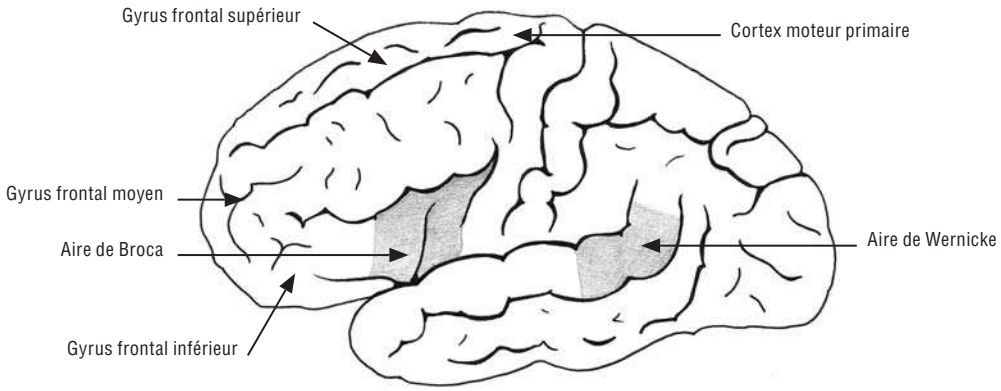
6. La substance grise est un tissu neural essentiellement composé du corps des neurones, des dendrites et de tissu fonctionnel. La substance blanche est un tissu nerveux principalement composé d'axones qui envoient et reçoivent l'information, connectant entre elles différentes régions du cerveau.
7. Tout dégât infligé à l'un de ces réseaux ou à leurs connexions sera préjudiciable aux compétences qu'ils déterminent, et à chaque anomalie possible correspondent des déficits bien précis.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

compréhension du langage. Elle est reliée à *l'aire de Wernicke*, à la jonction des lobes temporal et pariétal, associée à la reconnaissance du langage parlé[8].

Les *lobes frontaux* sont associés à de nombreuses fonctions cognitives supérieures, dont la planification, le jugement, la mémoire, la résolution de problèmes et le comportement. On peut dire que globalement, le cortex frontal a pour fonction exécutive le contrôle et la coordination du comportement, y compris les comportements socialement indésirables[9]. À mesure que le cerveau gagne en maturité, il se myélinise progressivement, de l'arrière vers l'avant. Puisque les axones myélinisés transmettent l'information plus vite que ceux qui ne le sont pas, la maturation du cerveau permet probablement un meilleur fonctionnement exécutif. Au contraire, la démyélinisation (perte de myéline) est liée à des maladies comme la sclérose en plaques[10].

Graphique 2.3. **Le lobe frontal**



Source : Odile Pavot pour l'OCDE.

Le *lobe pariétal* est constitué du lobule pariétal supérieur et du lobule pariétal inférieur, séparés par le sillon intrapariétal. Le precuneus, le gyrus postcentral, le gyrus supramaginal et le gyrus angulaire en font partie. Certaines aires du lobe pariétal sont associées à l'apprentissage des mathématiques (voir le chapitre 5). Le lobe pariétal sert aussi à

8. L'aphasie de Broca (qui peut survenir quand l'aire du même nom est endommagée) limite considérablement les capacités d'un individu à former ou à comprendre des phrases complexes. De même, si l'aire de Wernicke est endommagée, le traitement du langage s'en trouvera également très déficient.
9. Un lobe frontal endommagé ou immature peut entraîner des comportements impulsifs, diminuer la capacité de prévoir des enchaînements d'actions complexes et empêcher l'adaptabilité ou la persévérance. David Servan-Schreiber a donné lors du Forum coorganisé par le CERI et le Sackler Institute à New York sur « Les mécanismes cérébraux et l'apprentissage durant l'enfance » (2000) un exemple de ce qui peut arriver quand le lobe frontal est touché : Antonio Damasio a étudié un comptable de l'Iowa, fort intelligent selon les critères traditionnels (QI de 130) et ayant réussi dans sa partie, sur qui on a dû procéder à l'ablation d'une partie du cerveau suite à une lésion. Après l'opération, il a conservé un QI supérieur à la moyenne pendant plusieurs années, durant lesquelles il est resté sous observation médicale. Cependant, son jugement social s'en est trouvé si affecté qu'il a perdu son emploi, a échoué à en conserver un autre, s'est retrouvé impliqué dans des entreprises à la limite de la légalité, et a fini par divorcer après 17 ans de mariage pour épouser en secondes noces une femme riche mais considérablement plus âgée que lui.
10. La sclérose en plaques est une maladie auto-immune chronique qui touche le système nerveux central. La myéline se désintègre peu à peu, par plaques, dans le cerveau ou la moelle épinière (ou les deux). Les circuits neuraux sont endommagés, ce qui entraîne une faiblesse musculaire, une perte de coordination et des anomalies de la parole et de la vision.

intégrer l'information sensorielle et traite les données visuelles et spatiales. Le gyrus angulaire traite du langage et de la cognition, y compris les métaphores et l'abstraction.

Le *lobe temporal* gère les signaux sonores et l'audition, y compris le traitement de la parole – surtout le *lobe temporal gauche*. Il est associé aux noms, à la compréhension et aux autres fonctions langagières. Le *gyrus fusiforme gauche*, lui, est associé à la reconnaissance des mots, des nombres, des visages, et au traitement des couleurs.

Le *lobe occipital* se trouve à l'arrière du cerveau, au-dessus du cervelet, et abrite le cortex visuel primaire. Il est associé au traitement des informations visuelles, à la différentiation des couleurs et des mouvements.

Comment le cerveau apprend au cours de la vie

> Qui cesse d'être étudiant n'a jamais été étudiant.
>
> *George Iles*

On a récemment découvert que certaines zones du cerveau, dont le très important hippocampe, génèrent de nouveaux neurones tout au long de la vie. La naissance de nouveaux neurones (neurogénèse), combinée à la mort d'autres neurones, modifie la structure du cerveau tout au long de la vie. De surcroît, les neurones redéfinissent continuellement leurs connexions à travers la formation de nouvelles synapses (synaptogénèse), le renforcement, l'affaiblissement et la suppression de synapses existantes (élagage). De nouveaux neurones et de nouvelles synapses se créent durant toute l'existence, tandis que le cerveau traite l'information qu'il reçoit de l'environnement. Les plus actives des synapses se renforcent tandis que les moins actives s'affaiblissent. Avec le temps, les connexions inactives s'affaiblisssent, et, lorsque toutes les connexions d'un même neurone restent longtemps inactives, la cellule elle-même peut finir par mourir. À travers ces mécanismes, le cerveau se reconfigure pour s'adapter à l'environnement. Il peut ainsi gagner en efficacité, en tenant compte de l'expérience pour développer une architecture optimale (Sebastian, 2004; Goswami, 2004; Koizumi, 2005). Ces changements structurels permettent au cerveau d'apprendre.

Plasticité et périodes sensibles

Les neuroscientifiques savent depuis un certain temps que le cerveau change de façon significative durant la vie en fonction des expériences d'apprentissage. Cette flexibilité du cerveau face aux demandes de son environnement est appelée *plasticité*; le cerveau subit des modifications concrètes, physiques, à mesure que les synapses se modifient. L'importance des modifications dépend du type d'apprentissage – plus celui-ci s'étend dans la durée, plus les modifications sont majeures.

La capacité du cerveau à demeurer flexible, vif, réactif et orienté vers la résolution de problèmes s'explique par sa plasticité, capacité qu'il conserve tout au long de la vie. Il fut un temps où l'on pensait que seul le cerveau de l'enfant était plastique. Cette croyance était due à l'extraordinaire croissance de nouvelles synapses se déroulant en parallèle à l'acquisition de nouvelles compétences. Cependant, les données collectées durant les deux dernières décennies ont confirmé que *le cerveau conserve sa plasticité toute la vie durant. Et comme la plasticité est à la base des apprentissages, on peut apprendre à tout âge, même si de manière différente, par des moyens différents et en passant par des étapes différentes* (Koizumi, 2003; OCDE, 2002).

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Il existe deux types de plasticité : celle qui attend de recevoir de l'expérience, et celle qui dépend de l'expérience. La *plasticité attendant de recevoir de l'expérience* est liée à la synaptogénèse naturelle du début de la vie, et la *plasticité dépendant de l'expérience* à la synaptogénèse due à l'exposition à des environnements complexes tout au long de la vie[11]. De nombreux chercheurs pensent que la plasticité attendant de recevoir de l'expérience caractérise le développement commun à toute l'espèce humaine : elle est l'état naturel d'un cerveau sain – il est possible d'apprendre jusqu'à la mort.

De la même façon, il existe deux types d'apprentissage : l'apprentissage attendant de recevoir de l'expérience et l'apprentissage dépendant de l'expérience. L'*apprentissage attendant de recevoir de l'expérience* se produit quand le cerveau est exposé à la bonne expérience au moment approprié (c'est-à-dire durant la période sensible). Les périodes sensibles sont les laps de temps où un phénomène biologique peut se produire de façon optimale[12]. Les scientifiques ont établi l'existence de périodes sensibles pour certains types de stimuli sensoriels (tels la vision et les sons du langage) et pour certaines expériences émotionnelles et cognitives (exposition à une langue, par exemple). Cependant, il existe de nombreuses compétences mentales, telles que la lecture ou l'acquisition du vocabulaire, dont le développement ne semble pas dépendre de périodes sensibles. On pourrait les considérer comme un type d'*apprentissage dépendant de l'expérience*, susceptible donc de se produire tout au long de la vie.

Les différents types de plasticité jouent un rôle différent selon les étapes de la vie. La section suivante s'intéresse à trois de ces étapes : la petite enfance, l'adolescence et l'âge adulte (y compris l'âge mûr), et décrit les caractéristiques propres aux processus d'apprentissage pour chacun de ces trois groupes. La seconde partie de ce livre traite également de ces stades clés.

La petite enfance (environ 3 à 10 ans)

> La première direction que prend un homme vient de son éducation et détermine sa vie future.
>
> *Platon*

Depuis une bonne décennie, la prise en charge et la scolarisation des très jeunes enfants suscite beaucoup d'intérêt, entre autres du fait d'études montrant l'importance chez les plus petits des expériences positives pour le développement cognitif, social et émotionnel à court terme, et, à plus long terme, pour leur réussite à l'école et dans la vie. De plus, il est maintenant reconnu qu'un accès équitable à des structures d'accueil et de scolarisation des enfants d'âge préscolaire est une condition fondamentale pour un bon apprentissage tout au long de la vie, et qu'un tel accès est adapté aux besoins éducatifs et sociaux des familles. Dans la plupart des pays de l'OCDE, la tendance est actuellement de proposer au moins deux ans d'éducation gratuite avant l'entrée à l'école obligatoire. Dans un tel contexte, les gouvernements s'efforcent d'améliorer la formation et les conditions de travail du personnel, et de mettre au point des cadres pédagogiques adaptés aux jeunes

11. La myélinisation est également considérée comme relevant de la plasticité dépendant de l'expérience (Stevens et Fields, 2000).
12. Les périodes sensibles doivent être vues comme des « fenêtres d'opportunité »; mais si on rate la fenêtre, il est faux de croire que l'occasion est définitivement perdue.

enfants (OCDE, 2001). La neuroscience ne pourra pas résoudre tous les défis posés par l'éducation des tout-petits; elle peut, en revanche, apporter un éclairage fort utile et permettre des prises de décisions informées dans ce domaine.

On sait aujourd'hui que les très jeunes enfants sont capables d'une compréhension sophistiquée du monde qui les entoure. Ce sont des « apprenants actifs » (US National Research Council, 1999). Même au moment de la naissance, le cerveau de l'enfant n'est pas une *tabula rasa*. De plus, les enfants développent extrêmement tôt des théories sur le monde, théories qu'ils révisent à la lueur de l'expérience. Parmi les domaines de l'apprentissage de la petite enfance figurent la linguistique, la psychologie, la biologie et la physique – comment fonctionnent le langage, les gens, les animaux, les plantes et les objets. Il est nécessaire que l'éducation du premier âge prenne mieux en compte les caractéristiques spécifiques de l'esprit de l'enfant, ainsi que la conception individuelle de celui-ci. Cela permettrait d'identifier ses méthodes éducatives préférées, par exemple le jeu[13].

Les jeunes enfants ont une compétence pour les nombres. Des bébés de quelques mois sont déjà conscients du nombre d'objets qui les entourent (McCrink et Wynn, 2004). Ils peuvent aussi effectuer des opérations sur ces nombres (Dehaene, 1997). Ils développent leurs compétences mathématiques grâce à l'interaction avec l'environnement, et en se fondant sur leur sens des nombres (voir le chapitre 5 pour plus de détails). Il convient alors de se demander comment mettre à profit les compétences déjà en place chez les enfants. Y a-t-il un moment optimal, et des façons d'apprendre idéales?

Les non-spécialistes croyaient (et croient peut-être encore) que c'est jusqu'à trois ans que les enfants sont les plus réceptifs à l'apprentissage (Bruer, 1999)[14]. En conséquence, on a tendance à considérer que si à cet âge un enfant n'a pas été *pleinement et totalement* exposé à divers stimuli, il ne pourra jamais par la suite *récupérer* ces capacités. Pourtant, même quand des périodes sensibles existent effectivement, l'apprentissage reste possible ensuite. Il n'y a aucune preuve scientifique que stimuler intensivement un enfant normal soit bénéfique; au contraire, il semble bien que ce soit une perte de temps (Sebastian, 2004). Cela dit, ces découvertes concernent des fonctions très basiques (comme la vision). Il ne

13. Selon Alison Gopnik (lors du Forum coorganisé par le CERI et le Sackler Institute à New York sur « Les mécanismes cérébraux et l'apprentissage durant l'enfance », 2000), les nourrissons ont la capacité innée d'apprendre le langage. Mais ils apprennent aussi la façon dont ceux qui les entourent pensent et ressentent, et en quoi cela est lié à leurs propres pensées et sentiments. Les enfants apprennent la psychologie de tous les jours. Ils apprennent aussi la physique de tous les jours (comment les objets se déplacent et comment interagir avec eux) et la biologie de tous les jours (comment fonctionnent ces objets vivants que sont les plantes et les animaux). Ils maîtrisent ces domaines complexes avant que ne débute leur scolarité officielle. Les experts aimeraient que l'école prolonge cet apprentissage effectué par les enfants dans leur environnement d'origine. Par exemple, il serait sensé d'enseigner la psychologie de tous les jours à l'école maternelle. Dans le cas de la physique et de la biologie, l'école pourrait partir des conceptions naturelles (justes ou erronées) que les enfants ont de la réalité pour leur faire acquérir une véritable compréhension des concepts scientifiques qui en rendent compte. L'école pourrait tirer un meilleur parti du jeu, de l'exploration spontanée, de la prédiction et de la rétroaction, autant d'outils apparemment puissants dans l'apprentissage spontané à la maison. L'école devrait offrir même à l'enfant le plus jeune la chance d'être un scientifique plutôt que de simplement lui parler de science.
14. Les trois premières années de la vie ont toujours fait l'objet d'un malentendu. Un mauvais usage de données scientifiques sur la synaptogénèse a donné naissance à plusieurs idées extrêmement populaires mais néanmoins fausses. Ces « neuromythes » sont abordés en détail au chapitre 6. Il faut néanmoins citer ici l'un des plus populaires dans le domaine de la petite enfance, à quoi on doit la vogue des moyens de « stimuler le cerveau des bébés » (CD, etc.) et la croissance du marché des outils d'apprentissages « fondés sur la neuroscience ». Cela montre à quel point il est important de bien comprendre les résultats obtenus par la science avant de les utiliser pour mettre au point des pratiques éducatives.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

serait pas pertinent de les élargir mécaniquement à l'apprentissage de compétences cognitives. Pour comprendre plus précisément en quoi les expériences vécues durant la petite enfance influencent le développement ultérieur, il serait nécessaire de mener une étude de cohorte à très grande échelle[15].

Cependant, les périodes sensibles existent bel et bien pour certains domaines de l'apprentissage tels que l'acquisition du langage (voir chapitre 4). Cela n'implique pas qu'il soit impossible d'apprendre une langue étrangère au-delà d'un certain âge. Tout dépend à quel aspect du langage on s'intéresse. Neville (OCDE, 2000) précise que l'apprentissage d'une deuxième langue implique compréhension et production, et que, par conséquent, la maîtrise de différents processus est nécessaire. Deux de ces processus, le traitement syntaxique et le traitement sémantique, s'appuient sur des systèmes neuraux différents. Le traitement de la grammaire met en œuvre des régions frontales de l'hémisphère gauche, tandis que le traitement sémantique (qui comprend l'acquisition du vocabulaire) active les régions latérales postérieures des deux hémisphères. Des recherches ont montré que plus on apprenait tardivement la grammaire, plus le cerveau devenait actif[16]. Au lieu de traiter l'information grammaticale avec le seul hémisphère gauche, les apprenants tardifs utilisent les deux hémisphères. Ce changement dans l'activation cérébrale montre qu'une exposition retardée au langage conduit le cerveau à utiliser une stratégie différente pour le traitement de la grammaire. Des études conçues pour confirmer ce point ont en outre montré que des sujets présentant cette activation bilatérale du cerveau rencontraient davantage de difficultés dans l'utilisation correcte de la grammaire. En d'autres termes, l'activation bilatérale du cerveau, dans le cas présent, indique probablement une plus grande difficulté d'apprentissage. Donc, plus tôt l'enfant est exposé à la grammaire d'une langue étrangère, plus il la maîtrisera avec rapidité et facilité. L'apprentissage sémantique, toutefois, peut se poursuivre (et, de fait, se poursuit) durant toute la vie, sans être limité dans le temps.

L'acquisition des phonèmes est un autre exemple de période sensible. Des recherches ont montré que des bébés de quelques mois sont capables de distinguer des différences subtiles, mais pertinentes, entre des consonnes proches et entre des voyelles proches, que ce soit dans leur langue maternelle ou dans une langue étrangère. Alors qu'on pense généralement que le sommeil est un état passif, dans lequel les capacités d'attention et d'apprentissage sont réduites ou inexistantes, on s'est aperçu qu'en quelques heures, des nouveaux-nés humains peuvent apprendre à différencier des phonèmes « proches » les uns des autres même quand ils dorment (Cheour et autres, 2002a; voir aussi chapitre 3). Mais au cours de leur première année, ils ajustent cette capacité pour la spécialiser dans les sons de leur langue maternelle. C'est entre huit et dix mois que ce déclin est le plus sensible (Werker, 2002; Kuhl, 1979). Ce processus permet d'améliorer l'efficacité des

15. Kozorovitsky et autres (2005) expliquent que les expériences vécues pendant la petite enfance entraînent à l'âge adulte des modifications structurelles et biochimiques dans le cerveau des primates. Depuis 2004, des études de cohortes fondées sur la recherche neuroscientifique sont menées par le Research Institute of Science and Technology for Society (RISTEX) de la Japan Science and Technology Agency (JST). Leur but, entre autres, est d'étudier ces questions (voir chapitre 7, encadré 7.8).
16. Un surcroît d'activité cérébrale signifie le plus souvent que le cerveau éprouve des difficultés à exécuter la tâche qu'on lui a confiée : par exemple, un lecteur confirmé présentera une activité cérébrale moins importante qu'un lecteur débutant lors d'une expérience de reconnaissance de mots.

fonctions cérébrales en les adaptant à l'environnement naturel. Exposer les bébés à des langues étrangères en leur faisant écouter des CD ne suffit pas à conserver leur sensibilité aux phonèmes étrangers[17].

Cependant, l'acquisition de phonèmes étrangers peut se produire même après la fin de la période sensible. Cheour et autres (2002b) ont montré que des enfants de 3 à 6 ans peuvent le faire, dans leur environnement naturel et sans entraînement particulier, en deux mois. McCandliss suggère que, après un court apprentissage, des adultes dont la langue maternelle est le japonais arrivent à distinguer le /r/ du /l/ en anglais (McCandliss lors du Forum coorganisé par le CERI et le Sackler Institute à New York sur « Les mécanismes cérébraux et l'apprentissage durant l'enfance » (2000)[18]. Il faut cependant garder à l'esprit que le plus important, quand on apprend une langue, c'est de pouvoir communiquer : différencier très finement les phonèmes n'est pas forcément indispensable. Pour savoir s'il vaut la peine de passer du temps à s'y entraîner, il faut déterminer le niveau de précision nécessaire en fonction des situations.

L'adolescence (environ 10 à 20 ans)

> Le fondement de tout État est l'éducation de ses jeunes.
>
> *Diogène Laërce*

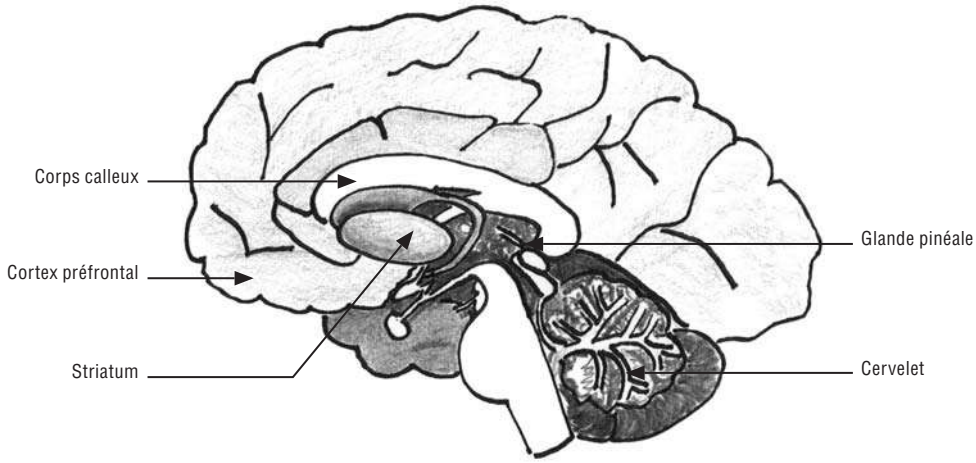
Jusqu'à l'émergence des techniques d'imagerie cérébrale, la plupart des scientifiques (y compris les psychologues) considéraient qu'après douze ans le cerveau n'évoluait plus. L'une des raisons qui ont donné naissance à cette idée fausse est qu'à partir de l'enfance, le cerveau ne grossit presque plus. Le cerveau d'un enfant de six ans présente déjà un volume de l'ordre de 90 à 95 % du volume de celui d'un adulte. Pourtant, malgré cela, le cerveau adolescent peut être comparé à un « chantier ». L'imagerie cérébrale a montré que le cerveau continue à grandir et à se myéliniser jusqu'au début de l'âge adulte (entre 20 et 30 ans). Les images de cerveaux adolescents obtenues par Jay Giedd à l'Institut Américain de Santé Mentale montrent non seulement qu'ils sont loin d'être arrivés à maturité, mais aussi que les substances blanches et grises subissent d'importantes modifications structurelles bien après la puberté (Giedd et autres, 1999 ; 2004). Les recherches de Giedd révèlent qu'une deuxième vague de synaptogénèse et d'élagage se produit plus tard dans l'enfance pour culminer à la fin de l'adolescence en affectant les fonctions mentales supérieures. Au contraire de ce qui se passe durant la gestation, ce n'est pas le nombre de cellules neurales qui est modifié, mais le nombre de synapses qui les relient (Wallis et autres, 2004 ; Giedd et autres, 1999 ; Giedd, 2004).

Plusieurs zones du cerveau se modifient à l'adolescence (voir le graphique 2.4). Premièrement, le *striatum ventral droit*, qui régule un système de récompense cérébrale[19] (les adolescents peuvent adopter des comportements risqués mais immédiatement

17. Les parents peuvent se demander comment développer les compétences de leurs enfants pour plusieurs langues. Malheureusement, on ne dispose pas pour l'instant de données suffisantes pour répondre à cette question de façon complète. Le CERI envisage de s'intéresser à ce sujet important dans un projet à venir.
18. On sait que les personnes dont la langue maternelle est le japonais rencontrent des difficultés considérables pour distinguer les sons anglais /r/ et /l/ (par exemple dans les mots « load » [chargement] et « road » [route]).
19. Une étude réalisée par James M. Bjork (Institut national sur l'abus d'alcool et l'alcoolisme) montre que, lors de séries de paris permettant d'obtenir des récompenses, cette aire du cerveau est moins active et moins fiable chez les adolescents que chez les adultes (Bjork et autres, 2004).

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Graphique 2.4. **Le cerveau de l'adolescent**



Source : Odile Pavot pour l'OCDE.

gratifiants[20]). Deuxièmement, le *corps calleux*, qui se développe autour de la puberté. Troisièmement, la *glande pinéale* produisant la mélatonine (l'hormone du sommeil), qui semble en déclencher la sécrétion beaucoup plus tard dans la journée que chez les enfants ou les adultes. Quatrièmement, le *cervelet* (la partie du cerveau qui gère la posture, le mouvement et l'équilibre, d'autres fonctions cognitives dont le langage[21], et qui influe sur des zones cérébrales responsables de la motricité), qui ne finit de grandir qu'à la fin de l'adolescence. Enfin, le *cortex préfrontal*, responsable de fonctions exécutives importantes et de processus de cognition supérieurs, qui est la dernière zone du cerveau à subir un élagage. Cette zone grandit à la fin de l'enfance, puis se rétrécit durant l'adolescence à mesure que les synapses sont élaguées. Des études récentes ont montré que la façon dont le cortex préfrontal se développe à l'adolescence pourrait affecter la régulation émotionnelle.

Une étude (Blanton et autres, 2004) s'est intéressée aux différences entre garçons et filles dans le développement cognitif à l'adolescence. Il s'agissait d'examiner les différences dans le développement et la latéralisation[22] du langage dans le cerveau, sur un panel constitué de garçons et de filles d'environ 11 ans. Avec le temps, le gyrus frontal

20. Cela dit, l'immaturité du striatum ventral droit ne suffit pas à expliquer l'ensemble des comportements à risques adoptés par les adolescents. Les facteurs environnementaux (pauvreté, composition de la famille, influence de l'entourage) sont bien entendu également décisifs.
21. Il s'agit d'un concept récent, découvert ces 20 dernières années par la neuroscience. Le cervelet est relié au cortex cérébral *via* une boucle de communication. Le cervelet apporte au cortex l'aide de ses capacités de calcul, et joue ainsi un rôle dans l'ensemble des compétences, motrices aussi bien que mentales (par exemple la pensée). Ainsi, on sait à présent que l'autisme et les symptômes schizophréniques (illusions et hallucinations) sont, au moins en partie, causés par des dysfonctionnements du cervelet. De plus, une étude de Catherine Limperopoulos (Harvard) montre que les développements du cerebrum et du cervelet sont liés. Quand le cerebrum est lésé, le cervelet n'atteint pas sa taille normale. De même, si c'est un hémisphère du cervelet qui est blessé, l'autre côté du cerebrum reste plus petit que la normale. Limperopoulos et ses collègues suggèrent qu'en plus de problèmes moteurs, les enfants nés avec des lésions du cervelet ont des difficultés avec les processus cognitifs supérieurs comme la communication, le comportement social et la perception visuelle. On voit l' importance du lien cerebrum-cervelet dans le développement cérébral, et les difficultés que des troubles à ce niveau peuvent entraîner dans les domaines de la communication, des rapports sociaux et de l'apprentissage (Masao Ito, 2005, sur demande du Secrétariat de l'OCDE).
22. Localisation d'une fonction majoritairement située dans l'hémisphère droit ou dans l'hémisphère gauche.

inférieur gauche[23] des garçons développe davantage de substance grise et de substance blanche que celui des filles. La zone est d'ailleurs plus grande chez les garçons. Chez les deux sexes, le développement est asymétrique (le côté droit grandit plus vite), mais ne se produit pas exactement dans les mêmes aires du cortex préfrontal.

L'adolescence est une période de changements mentaux très importants, qui affectent la construction émotionnelle : conscience sociale, caractère et tendances à développer des maladies mentales. À ce moment-là, les enfants sont particulièrement disponibles, non seulement aux expériences d'apprentissage mais aussi pour le développement social. Des comportements violents et antisociaux peuvent aussi apparaître[24]. L'adolescence est une période cruciale pour le développement émotionnel, en raison (entre autres) de la grande quantité d'hormones présentes dans le cerveau. On a récemment découvert que les hormones sexuelles, très importantes pour les émotions des adolescents, agissent sur le centre émotionnel du cerveau (le système limbique, voir graphique 3.1). Ces hormones influencent directement l'émission de sérotonine et d'autres neurotransmetteurs régulant l'humeur, ce qui entraîne les prises de risques chères aux adolescents. Ainsi, une étude sur la gestion des risques fondée sur une simulation de conduite automobile a montré que, lorsqu'ils jouent entre eux, les adolescents prennent davantage de risques que les adultes, alors que les membres des deux groupes sont également prudents quand ils jouent seuls (Steinberg, 2004). Selon la psychologue Laurence Temple, « les parties du cerveau responsables d'éléments comme la recherche de sensations fortes sont particulièrement actives vers la puberté, mais celles auxquelles est dû l'exercice du jugement sont toujours en cours de maturation. Cela revient à confier une voiture en marche à quelqu'un qui n'a pas le permis. » (Wallis et autres, 2004). L'immaturité du cortex préfrontal des adolescents joue donc un rôle crucial dans l'instabilité de leur comportement[25].

Les implications des dernières découvertes sur l'immaturité des capacités décisionnelles des adolescents pourraient avoir des conséquences sérieuses sur les décisions politiques concernant cette tranche d'âge. Par exemple, la « sélection » opérée au collège dans la plupart des pays n'est peut-être pas idéale puisque le cerveau adolescent est encore immature[26]. De la même manière, l'âge légal pour conduire une voiture (notamment aux États-Unis) pourrait être reconsidéré. Selon l'Institut américain d'assurance pour la sécurité sur les autoroutes, les adolescents ont quatre fois plus de risques d'être impliqués dans un accident de voiture que les conducteurs plus âgés, et trois fois plus de risques de mourir sur la route. Certains États américains envisagent donc de modifier la loi pour imposer des formations plus poussées, limiter le nombre de passagers autorisés et interdire l'utilisation du téléphone portable pour certains conducteurs adolescents[27].

23. Le gyrus frontal inférieur gauche est fortement impliqué dans le développement et le traitement du langage, et dans les fonctions cognitives supérieures.
24. À l'adolescence, la fréquence des comportements antisociaux est multipliée par dix (Moffitt, 1993).
25. Le précortex des adolescents n'étant pas pleinement développé, il leur faut utiliser une autre aire cérébrale : l'amygdale (pour plus de détails, voir le chapitre 3). Lors d'une étude par IRMf où il était demandé d'identifier les émotions exprimées par des visages sur des photographies, les adolescents faisaient massivement appel à leur amygdale alors que les adultes utilisaient davantage le lobe frontal (Baird et autres, 1999).
26. Les résultats de PISA 2000 et 2003 (OCDE) suggèrent que ces méthodes de sélection scolaire sont par ailleurs inefficaces et contre-productives. La neuroscience pourrait éclairer cette conclusion en montrant comment le cerveau émotionnel des adolescents réagit à l'environnement scolaire.
27. Il faut cependant noter que les conducteurs plus âgés ont en moyenne une plus grande expérience de la conduite, ce qui peut aussi influer sur la différence de fréquence des accidents.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

L'adolescence est également la période où les principales maladies mentales (dépression, schizophrénie[28], maniaco-dépression) font leur apparition, ce qui pourrait contribuer à expliquer le taux élevé de suicides chez les adolescents. En 1988, Kashani et Sherman ont mené des études épidémiologiques qui révèlent qu'aux États-Unis, 0.9 % des jeunes enfants, 1.9 % des élèves de niveau primaire et 4.7 % des adolescents souffrent de dépression[29]. Les filles sont deux fois plus touchées que les garçons, peut-être parce que les rapports sociaux ont plus d'importance pour elles : elles ont davantage besoin de rapports sociaux de qualité, et la rupture des liens sociaux les touche davantage que les garçons (Allgood-Merten et autres, 1990). Cela peut les rendre plus vulnérables au stress dû aux problèmes relationnels, courants chez les adolescents. On a également montré que les méthodes utilisées par les filles pour gérer le stress font moins appel au déni, et davantage à des pensées répétitives centrées sur l'événement générateur de stress (Nolen-Hoeksema et Girgus, 1994). La plus grande fréquence de la dépression chez les filles pourrait donc être due à leur plus grande vulnérabilité, combinée à des mécanismes de gestion de crise différents de ceux des garçons.

De nouvelles études sur les différences cérébrales individuelles – surtout les différences entre les sexes durant l'adolescence – pourraient permettre de mieux comprendre les façons dont chacun évolue, et les manières dont l'individu réagit aux stimulations environnementales. Il faut également noter que c'est vers le milieu de l'adolescence que le suicide est le plus fréquent, et que c'est la troisième cause de décès à cet âge-là (Hoyert et autres, 1999). Les risques d'échec scolaire et de suicide sont élevés chez les

Tableau 2.1. **Comment le cerveau apprend : récapitulatif**

	Enfance (3-10 ans)	Préadolescence (10-13 ans)	Adolescence (13-20 ans)
Maturation cérébrale[1]	Région frontale de l'hémisphère gauche	Striatum ventral droit Cervelet Corps calleux Glande pinéale	Cortext préfrontal Cervelet
Fonctions associées[2]	Langage (grammaire)	Récompenses motivantes Posture et mouvements Langage Sommeil	Fonctions exécutives Posture et mouvements
Moment « optimal » pour apprendre[3]	Langage (grammaire, phonétique)[4] Musique[5]	Non traité	Non traité

1. Les catégories employées ici ne permettent pas de fournir une liste exhaustive des changements liés à la maturation cérébrale.
2. Les catégories employées ici ne permettent pas de fournir une liste exhaustive des fonctions liées à toutes les régions cérébrales.
3. Il est possible qu'il existe d'autres sensibilités développementales qui ne sont pas mentionnées ici.
4. Bien que certains aspects du langage soient acquis plus efficacement durant l'enfance, on peut apprendre une langue à tout âge. De plus, l'âge « optimal » présenté ici n'est qu'une moyenne. Les différences individuelles sont importantes.
5. Bien que certains aspects de la musique soient acquis plus efficacement durant l'enfance, on peut apprendre la musique à tout âge. De plus, l'âge « optimal » présenté ici n'est qu'une moyenne. Les différences individuelles sont importantes.

28. Des études par IRM ont montré que, alors que l'adolescent moyen perd environ 15 % de substance grise corticale, ceux qui souffrent de schizophrénie en perdent jusqu'à 25 % (Lipton, 2001).
29. Cette maladie peut aller de la simple tristesse à des troubles dépressifs ou maniaco-dépressifs majeurs. Parmi les facteurs de risques se trouvent l'histoire familiale et de mauvaises performances scolaires.

adolescents dépressifs; de nouvelles études sur le cerveau des adolescents pourraient mieux expliquer les maladies mentales et contribuer à la détection et à la prévention.

Le tableau 2.1 résume ce qu'on sait aujourd'hui de la façon dont le cerveau apprend pendant les premières phases de la vie. Il est incomplet, tout simplement parce qu'on est loin de tout savoir dans ce domaine. Ainsi, la neuroscience cognitive n'en sait pas encore assez sur les processus d'apprentissage à l'œuvre chez les adultes et les seniors. Vu l'importance que des recherches sur le sujet pourraient avoir dans des sociétés vieillissantes, il est fondamental de progresser.

L'âge adulte et la vieillesse

> L'éducation est le meilleur viatique pour le grand âge.
>
> *Aristote*

Depuis dix ans, l'apprentissage des adultes est d'autant plus important que les sociétés contemporaines requièrent davantage de connaissances. Le fort taux de chômage chez les personnes peu qualifiées, et l'importance du capital humain pour la croissance économique et le développement social, rendent les possibilités d'apprentissage très importantes pour les adultes. Pourtant, le taux de participation aux programmes de formation reste parfois bas, surtout vers 50 ans où l'on observe un déclin prononcé. Il est très important d'adapter les méthodes didactiques afin de motiver les adultes (OCDE, 2005).

Contrairement au lieu commun qui veut que notre cerveau perde 100 000 neurones par jour, et que la tabagie et/ou l'alcoolisme accroisse encore ce chiffre, les nouvelles technologies ont permis de montrer que, si l'on compte le nombre total de neurones dans chaque zone du cortex cérébral, celui-ci ne dépend pas de l'âge (Terry, DeTeresa et Hansen, 1987). Le lien avec l'âge est remarquable seulement lorsque l'on compte le nombre de neurones « larges » dans le cortex cérébral. Ces neurones larges se rétrécissent; on constate donc une augmentation du nombre de neurones plus petits, mais le nombre global demeure inchangé. Toutefois, on constate une diminution des circuits neuronaux lorsque les neurones rapetissent, et on peut s'attendre à ce que le nombre de synapses soit réduit. De plus, il ne faut pas oublier qu'une connectivité réduite signifie peut-être une plasticité réduite, mais qu'elle n'entraîne pas de réduction de la capacité cognitive. Au contraire, les modèles de réseaux neuraux ont appris aux chercheurs que l'acquisition des compétences résulte de l'élagage de certaines connexions et du renforcement de certaines autres. Il est donc possible d'apprendre tout au long de la vie.

Mais les adultes plus âgés apprennent-ils de la même façon que les jeunes? Beaucoup d'éléments montrent que les plus âgés ont une activité cérébrale moins spécifique, moins différenciée, lors d'un ensemble de tâches cognitives (Park et autres, 2001). Une étude japonaise récente a comparé la maîtrise du langage des jeunes adultes japonais à celle des adultes plus âgés (Tatsumi, 2001). On a demandé à des sujets jeunes et âgés de prononcer le plus grand nombre de mots dans une catégorie donnée (catégories sémantiques et phonologiques), pendant une durée de 30 secondes. Le nombre de mots que pouvaient prononcer les sujets âgés était à peu près égal à 75 % du nombre de mots prononcés par les sujets jeunes, ce qui montre une moindre aisance verbale. En outre, certaines personnes âgées présentent des difficultés pour se remémorer les noms de personnes célèbres (leur performance étant d'environ 55 % de celle des sujets les plus jeunes). Une étude d'activation TEP portant sur des sujets jeunes et âgés durant des tâches d'aisance verbale a montré que

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

chez les plus jeunes, le lobe temporal antérieur gauche et le lobe frontal étaient activés pendant la phase de remémoration des noms propres. Durant la phase de remémoration de noms d'animaux et d'objets, ainsi que durant la phase de maîtrise des syllabes, le lobe temporal inféro-postérieur gauche et le lobe frontal inférieur gauche (l'aire de Broca, voir graphique 2.3) sont activés. Par contraste, les zones activées chez les sujets âgés sont en général plus petites que chez les sujets jeunes, quand elles ne sont pas inactives. En outre, des zones qui restent inactives chez les sujets jeunes sont actives chez les sujets âgés (Tatsumi, 2001).

Les conclusions de ces découvertes ne sont pas définitives, car on pourrait interpréter ces dernières activations chez les sujets âgés comme résultant d'un effort pour compenser leurs déficiences en matière de remémoration de mots. Une autre conclusion, qui souligne la vitalité du cerveau vieillissant, précise que l'aisance ou l'expérience dans une tâche donnée réduit nécessairement le niveau d'activité. En supposant une plus grande efficience et une meilleure utilisation des mécanismes cérébraux, le traitement de ces tâches peut être transféré à d'autres zones du cerveau.

Récupérer grâce à l'apprentissage des fonctions cérébrales atteintes

Les fonctions cérébrales déclinent quand on arrête de les utiliser. Le concept d'apprentissage tout au long de la vie semble donc être bénéfique. On est en train de passer de « On n'apprend pas à un vieux singe à faire la grimace » à « Si un vieux singe cesse de faire des grimaces, il finira par ne plus en être capable ». Comment s'y prendre? Question importante, puisque la façon dont le cerveau est utilisé influence la façon dont il vieillit. Dans cette section, nous décrivons le déclin cérébral et les moyens d'y remédier par l'apprentissage.

Surmonter le déclin des fonctions cognitives

Notre cerveau est assez flexible pour nous permettre d'apprendre tout au long de la vie, mais certaines données montrent un déclin général des capacités cognitives de vingt à quatre-vingts ans. On a tendance à penser que le déclin commence nettement plus tard qu'à l'âge de vingt ans, simplement parce que c'est à la fin de l'âge adulte qu'il devient vraiment sensible. Peut-être aussi que le déclin des fonctions exécutives et de la mémoire à long terme chez les personnes d'âge mûr se remarque-t-il peu parce qu'il est compensé par une amélioration de l'expérience et des compétences (Park et autres, 2001). Cela dit, on connaît encore mal les relations entre augmentation des connaissances et déclin des fonctions exécutives et de la mémoire au cours de la vie. Davantage d'études sont nécessaires. Toutes les fonctions cognitives ne déclinent pas de la même façon. On remarque un déclin dans des tâches telles que la comparaison de lettres, la comparaison de structures, la rotation de lettres, le calcul, la lecture, la mémorisation avec ou sans indices, etc. Par contraste, on remarque certaines augmentations notables des capacités cognitives jusqu'à l'âge de soixante-dix ans, avec un certain déclin à quatre-vingts ans : par exemple, la maîtrise du vocabulaire révèle une expérience plus riche et de meilleures connaissances générales, compensant ainsi une partie des pertes subies par d'autres capacités cognitives (Park et autres, 2001; Tisserand et autres, 2001; 2002).

Il semble que le déclin lié à l'âge soit dû à plusieurs mécanismes cognitifs, non à un seul. Le fait que des processus exécutifs déclinent avec le temps contribue à fragiliser des fonctions cognitives supérieures comme le raisonnement et la mémoire (Park et autres, 2001). Des études comparant le déclin lié à l'âge de la fonction neurocognitive chez plusieurs individus montrent que la vitesse de traitement de l'information commence à

baisser dès la trentaine, surtout pour les processus cognitifs dépendant d'aires et de circuits situés dans le cortex préfrontal. Les « fonctions exécutives » sont donc parmi les premières à se dégrader, ce qui peut se manifester par une efficacité moindre dans le traitement d'informations nouvelles, une tendance à oublier les choses, un manque d'attention et de concentration, et un potentiel d'apprentissage plus réduit. De plus, il faut noter que les effets de l'âge varient à l'intérieur du cortex préfrontal : les aires dorso-latérale et médiane sont plus affectées que la région orbitale. Il est possible que cette différence entraîne un manque d'unité dans le cortex préfrontal, et soit l'une des causes du déclin cognitif (Tisserand et autres, 2001; 2002).

Un déclin des facultés cognitives supérieures lié au vieillissement n'affecte pas nécessairement la créativité. On dispose d'éléments permettant d'affirmer que la créativité est largement indépendante d'autres fonctions cognitives[30]. Une étude a permis d'examiner les effets du vieillissement sur la créativité chez des Japonais adultes âgés de vingt-cinq à quatre-vingt-trois ans. On n'a constaté aucune variation due à l'âge pour ce qui est de l'aisance, de l'originalité de pensée, de la productivité et de l'application d'une capacité créative. Cependant, on a noté des différences en fonction du sexe pour ce qui est de l'aisance et de la productivité, les femmes ayant des scores supérieurs aux hommes. Ces résultats suggèrent que diverses capacités créatives sont maintenues durant l'âge adulte[31].

La « forme physique », comme l'expérience, influence les fonctions cognitives (voir le chapitre 3). L'idée que santé physique et santé mentale sont liées est fort ancienne, et le poète latin Juvénal l'a exprimée ainsi : « mens sana in corpore sano » (« un esprit sain dans un corps sain »). Un examen de la littérature consacrée aux études animales permet de dégager un certain optimisme pour ce qui est de l'amélioration de la fonction cognitive (Anderson et autres, 2000). Une réanalyse récente des données diachroniques existantes utilisant des techniques méta-analytiques suggère une association plus positive et plus solide entre la forme physique et la vitalité cognitive, particulièrement pour ce qui est des processus exécutifs (gestion et contrôle des processus mentaux). Certaines données émergentes suggèrent que les régions du cerveau associées aux processus exécutifs (par exemple le cortex frontal et l'hippocampe) présentent des déclins liés au vieillissement d'une importance disproportionnée. Ces déclins peuvent être ralentis par une remise en forme physique. En particulier, on a pu démontrer une corrélation positive entre l'accomplissement des tâches et la fonction cardio-vasculaire. Des études plus précises dégagent également des résultats positifs en ce qui concerne l'orientation spatiale, le raisonnement inductif et les activités multitâches complexes comme la conduite automobile. Plus généralement, il existe des résultats non définitifs, mais de plus en plus nombreux, qui tendent à montrer que des interventions comportementales, parmi lesquelles la remise en forme physique et la redécouverte de l'apprentissage, peuvent contribuer à l'amélioration des performances même durant la vieillesse. Des recherches plus approfondies devront déterminer si ces résultats sont applicables en dehors du laboratoire.

30. Jellemer Jolles, seconde réunion du réseau du CERI sur l'apprentissage tout au long de la vie, Tokyo, 2003.
31. Hideaki Koizumi, troisième réunion du réseau du CERI sur l'apprentissage tout au long de la vie, Tokyo, 2004.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Récupérer les fonctions cérébrales endommagées

La flexibilité du cerveau se manifeste aussi par la réorganisation fonctionnelle qui se produit après que le cerveau a été endommagé. On rapporte le cas d'un bébé né avec des anomalies structurelles du cortex cérébral dont une grande partie était absente. Le cortex étant responsable de l'ensemble de l'expérience consciente – perception, émotion, pensée, planification –, le nouveau-né était dans un état végétatif. Le diagnostic « normal » voulait que le bébé reste sourd et aveugle, et on ne pouvait pas y remédier. Mais, alors que l'enfant avait 14 mois, les parents, convaincus qu'il voyait quelque chose, ont fait examiner son cerveau par topographie optique. On s'est alors aperçu que l'aire visuelle primaire du lobe occipital était active. Cet exemple montre à quel point le cerveau d'un bébé est flexible : il peut s'adapter à l'environnement et compenser les fonctions perdues (Koizumi, 2004). Mieux comprendre ces mécanismes compensatoires pourrait conduire à mettre au point des traitements efficaces pour remédier aux accidents cérébraux. Récemment, une étude sur trois ans a été lancée au Royaume-Uni, portant sur 60 jeunes de 10 à 16 ans, afin d'étudier l'influence des dommages cérébraux sur la parole et les capacités d'apprentissage, et la façon dont la flexibilité peut réorganiser le cerveau en réaction à des lésions endommageant certaines zones (Action Medical Research, 2005).

On sait également aujourd'hui que même un cerveau adulte endommagé reste plastique. Les compétences langagières de l'hémisphère dominant, perdues lors d'une attaque, peuvent être reconstituées dans l'hémisphère opposé. Dans certains cas, une activité spécifique au langage est rétablie dans l'hémisphère dominant un an environ après l'attaque. De plus, certaines études ont montré que, chez les personnes âgées, la réorganisation peut survenir dans les deux mois suivants l'attaque, lorsqu'elles se remettent de l'hémiparésie (Kato et autres, 2002; Koizumi, 2004).

Maladies neurodégénératives

À présent que l'espérance de vie atteint (ou s'approche de) quatre-vingts ans en divers points du globe, les sociétés concernées doivent faire face à des maladies qui touchent les personnes âgées – par exemple la maladie d'Alzheimer. L'impact de cette maladie neurodégénérative est surtout perceptible dans l'évolution de la fonction cognitive avec l'âge. Non seulement les maladies neurodégénératives peuvent priver l'individu de la conscience de son identité, mais en outre elles privent la société de l'expérience et de la sagesse qu'ont accumulées ceux qui en sont victimes. Avec le vieillissement de la population, l'ampleur du problème ne peut qu'augmenter.

Comme nous l'avons dit, la recherche sur les processus de vieillissement n'en est qu'à ses débuts. Néanmoins, on dispose d'un bon nombre d'études sur le cerveau malade chez l'adulte et le vieillard. Cela s'explique en partie par le coût important et sans cesse croissant des maladies neurodégénératives. On estime qu'en 2001, 18 millions de personnes dans le monde étaient atteints de la maladie d'Alzheimer. En 2025, on s'attend à ce que ce chiffre atteigne 34 millions. Cette maladie étant chronique et progressive, le coût pour la société est énorme (Organisation mondiale de la santé, 2001)[32]. Cependant, il existe un réel espoir de retarder l'apparition ou l'accélération des maladies neurodégénératives en les diagnostiquant à temps et en intervenant de façon appropriée. L'apprentissage tout au long

32. Pour l'année 2000, aux États-Unis, le coût national direct était estimé à 536 milliards de dollars, et le coût national total à 1 750 milliards. On ne connaît pas les chiffres pour d'autres pays (Organisation mondiale de la santé, 2001).

de la vie apparaît comme une stratégie particulièrement efficace pour lutter contre la sénilité et contre des affections telles que la maladie d'Alzheimer. En outre, les chercheurs ont constaté qu'en se focalisant sur la dégénérescence, on effectue souvent des découvertes de premier plan sur le fonctionnement normal du cerveau.

La maladie d'Alzheimer est responsable de dommages cérébraux irréversibles. Les symptômes de cette maladie se manifestent en général à la fin de l'âge adulte et incluent des déficiences marquées de la fonction cognitive, de la mémoire, de la maîtrise du langage et des capacités de perception. La pathologie cérébrale associée à la maladie d'Alzheimer est la formation de plaques séniles. Ces changements sont particulièrement évidents dans l'hippocampe, une partie du système limbique qui joue de plus un rôle essentiel dans la gestion de la mémoire à court terme (et dans la réception de nouvelles informations à envoyer au cortex pour stockage dans la mémoire à long terme). Comme il n'existe encore aucune méthode fiable pour détecter la maladie d'Alzheimer, mieux vaut essayer de diagnostiquer le déclenchement de celle-ci par l'étude du comportement ou les tests génétiques. Sur le plan du comportement, il est difficile de diagnostiquer la maladie lors de son premier stade, car on a encore peu de connaissances sur les altérations cognitives associées au vieillissement normal. Le déclin des fonctions cognitives avec l'âge présente des similitudes avec les symptômes précliniques de la maladie d'Alzheimer.

Selon certains chercheurs, il serait sans doute profitable de donner la priorité aux études portant sur les fonctions d'attention si l'on veut détecter la maladie d'Alzheimer dès ses premiers symptômes, et ce pour deux raisons. Primo, on constate que les fonctions d'attention sont atteintes même chez les patients très peu affectés par la maladie, ce qui fait peut-être d'elles des signaux d'alarme précieux. Secundo, parmi les zones principalement touchées par la maladie d'Alzheimer figure la fonction mémorielle, que l'on peut souvent étudier *via* les fonctions d'attention (voir encadré 3.2). Les systèmes neuraux gérant les fonctions d'attention sont relativement bien compris et ont fait l'objet de nombreuses études. Il est important de souligner que deux aspects de l'attention sélective spatiale (la variation d'attention et l'évaluation de l'échelle) sont sensiblement touchés lors des premiers stades de la maladie d'Alzheimer. Par conséquent, des tâches évaluant ces fonctions seront des candidats utiles lors des procédures de diagnostic. Des études utilisant les potentiels évoqués (ERP), la tomographie par émission de positons (TEP) et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) indiquent que les tâches d'attention donnent bel et bien des évaluations comportementales sensibles des premiers dysfonctionnements de l'attention.

Une autre approche permettant de détecter tôt la maladie d'Alzheimer consiste à identifier les adultes vieillissant normalement mais courant un risque génétique de développer la maladie. Des études récentes impliquent la transmission du gène apolipoprotéine E (APOE) dans le développement de la maladie d'Alzheimer[33]. Comparés aux personnes dépourvues de l'allèle e4, les porteurs de l'e4 présentent des déficits de l'attention spatiale qui sont qualitativement similaires à ceux que présentent les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer. Ces déficits consistent en un défaut d'attention accru et une capacité à l'attention spatiale fortement réduite. Ils peuvent se manifester chez des adultes par ailleurs sains et asymptomatiques ayant à peine atteint la cinquantaine.

33. Le gène APOE est hérité. L'allèle e4 est associé à un plus fort risque de développement de la maladie d'Alzheimer (Greenwood et autres, 2000).

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Les indicateurs comportementaux et génétiques peuvent tous deux mener au développement et à l'essai de nouveaux marqueurs destinés à prédire le déclin cognitif aigu chez les personnes âgées. Grâce à des possibilités de diagnostic améliorées, on peut développer et étendre les stratégies de traitement et d'intervention, tant comportementales que pharmacologiques, conçues pour renforcer les facultés cognitives chez l'adulte. On a montré que les bénéfices de l'entretien de l'attention (entraînement à la vivacité et à la vigilance) réduisaient la symptomatologie de la maladie d'Alzheimer en réduisant les déficits d'attention et en renforçant l'apprentissage à la fois chez les adultes sains et chez les patients souffrant de la maladie d'Alzheimer. Des interventions comme celles-ci sont potentiellement utiles, car la structure fine des connexions synaptiques dans le cerveau n'est pas directement contrôlée par la génétique mais modelée et remodelée par l'expérience tout au long de la vie.

La maladie d'Alzheimer peut également déboucher sur une dépression[34], une maladie associée à une foule de symptômes dont le manque d'énergie, de concentration et d'intérêt. Parmi les autres symptômes figurent l'insomnie, la perte d'appétit et l'anhédonie (l'incapacité à éprouver du plaisir). Chez les adultes âgés, contrairement à ce qui se passe chez les individus plus jeunes, la dépression présente une étiologie plus compliquée et est donc plus difficile à traiter. À l'instar d'autres affections liées au vieillissement, la dépression sénile a de lourdes conséquences sur la santé publique et, plus généralement, sur la société. Aujourd'hui, cette affection est, après la démence, la maladie mentale la plus fréquente chez les personnes âgées. Il y a une différence de taille entre la dépression chez les seniors et la dépression chez les jeunes adultes, en ce sens que la première semble moins liée à des facteurs génétiques. Outre les causes organiques citées plus haut, la dépression chez la personne âgée peut être déclenchée par la perte soudaine du rôle social, la perte d'un proche important pour le sujet et le déclin des capacités économiques, physiques et psychologiques.

Une avancée prometteuse s'est récemment produite au Japon dans le domaine de la remédiation aux maladies neurodégénératives. La « Learning Therapy » (voir l'encadré 2.1), développée et testée à Fukuoka (Japon), pourrait permettre de contrecarrer le déclin des fonctions cérébrales.

Certes, beaucoup de fonctions cognitives déclinent avec le temps; il faut néanmoins que la société prenne conscience du fait que *toutes* les fonctions cognitives *ne disparaissent pas* avec l'âge. Et puis, plus les personnes âgées ont la possibilité d'apprendre et d'utiliser leur savoir, plus les symptômes des maladies neurodégénératives sont retardés ou ralentis dans leur progression. Pour éviter que les seniors cessent d'apprendre, il faut encourager les adultes plus jeunes à apprendre. La société doit aussi faire en sorte que les personnes âgées ne soient pas brutalement privées de leur rôle social – leur vie professionnelle, et donc du sens de leur propre valeur. Une façon d'y parvenir est de trouver des moyens de valoriser et d'utiliser les contributions des seniors à la vie sociale. Encourager les personnes âgées à servir de mentors aux plus jeunes, ce qui serait bénéfique pour les deux parties, pourrait par conséquent améliorer la dépression d'origine psychologique chez les seniors. (Le tableau 2.2 résume les grandes idées exposées dans cette section.)

34. D'autres maladies, comme la maladie de Parkinson, voire certains traumatismes, pourraient aussi entraîner des dépressions.

Encadré 2.1. **La Learning Therapy (Japon)**

On a beaucoup investi pour mieux comprendre et combattre les maladies neurodégénératives. La Learning Therapy, conçue et appliquée au Japon, est l'une des méthodes d'intervention qui permet de combattre la démence sénile. Elle se fonde sur les apports de la neuroscience (fonction et caractéristiques du cortex préfrontal, imagerie cérébrale fonctionnelle) et cherche à « améliorer les fonctions mentales de l'apprenant – cognition préfrontale, communication, indépendance, capacité à satisfaire ses propres besoins, etc. – par l'apprentissage. L'apprenant et le formateur communiquent et utilisent ensemble un matériel d'étude centré sur la lecture à voix haute et le calcul » (Kawashima et autres, 2005), ce qui suggère que les seniors qui souffrent de démence sénile peuvent continuer à apprendre à condition de disposer d'un matériel approprié et de se trouver dans un environnement favorable.

Face aux cas de démence, les plus pertinentes des fonctions du cortex préfrontal sont la communication, l'indépendance et la mémoire à court terme. L'idée fondatrice de la Learning Therapy est qu'en améliorant ces fonctions, les personnes souffrant de démence sénile seraient capables de participer à la vie sociale malgré leur maladie. Au lieu de chercher à *guérir*, le but est d'apprendre à *vivre avec*.

Les techniques d'imagerie cérébrale ont permis aux chercheurs d'observer la façon dont les cerveaux atteints réagissent face à différentes activités. Après plusieurs années d'études, les résultats ont montré que des tâches simples (lire à haute voix et calculer) activent de multiples aires cérébrales, dont le cortex préfrontal, dans les deux hémisphères. Le principe fondamental de la Learning Therapy est de répéter chaque jour une tâche (très simple, de sorte que des gens qui sont déjà atteints par la maladie puissent l'effectuer) qui active le cerveau dans son ensemble. Normalement, à mesure qu'on apprend, l'activation cérébrale diminue. La clé de la Learning Therapy est que les tâches choisies (lire à voix haute et effectuer des calculs simples) sont telles que le cerveau garde le même niveau d'activation même si on les pratique régulièrement.

Cette méthode s'est révélée efficace. Par exemple, chez le groupe de gens souffrant de démence sénile qui ont suivi la Learning Therapy pendant 18 mois à raison de 20 minutes par jour, l'activité du cortex préfrontal a augmenté, alors qu'elle a décliné chez le groupe témoin n'ayant pas suivi la méthode. Après 18 mois, la différence entre ceux qui l'avaient pratiquée et les autres était très nette. De plus, le premier groupe restait capable de toutes les activités nécessaires à la vie quotidienne, alors que le second avait décliné.

Pour que les personnes âgées puissent apprendre, il faut certes que les tâches choisies soient adaptées, mais également que les conditions environnementales soient appropriées. Très souvent, ce n'est pas le cas, et c'est pourquoi nous avons tendance à croire que les seniors ne peuvent plus apprendre. Si la Learning Therapy fonctionne, c'est aussi parce qu'elle a mis au point un matériel et un environnement d'apprentissage adaptés aux personnes âgées. Parfois, ce sont des problèmes sensoriels périphériques qu'il faut traiter pour éviter la détérioration des fonctions cérébrales (réunion du réseau « Lifelong Learning » du CERI, Tokyo, 2005). Enfin, il faut souligner l'importance de la communication pendant le processus d'apprentissage. L'apprenant a besoin de voir son travail reconnu – et la Learning Therapy y attache beaucoup d'importance.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Tableau 2.2. **Déclin ou atteintes des fonctions cérébrales, et solutions possibles**

	Adultes	Personnes âgées
Zones du cerveau en déclin	Cortex préfrontal Hippocampe	Cortex préfrontal Hippocampe (formation de plaques séniles)
Processus cognitifs en déclin	Fonctions cognitives supérieures • Manque d'efficacité dans le traitement des informations nouvelles • Augmentation des pertes de mémoire • Manque d'attention et de concentration • Déclin du potentiel d'apprentissage	Fonctions cognitives • Mémoire • Langage • Perception • Communication
Maladies	Dépression	Démence sénile (incluant Alzheimer) Dépression
Comment supprimer, prévenir ou réduire la vitesse de déclin	Maintien d'une bonne forme physique Apprentissage en continu	Tâches d'attention (entraînement à la vivacité et à la vigilance) quand la maladie d'Alzheimer est diagnostiquée assez tôt Apprentissage (dont la « Learning Therapy ») en cas de démence

Conclusions

Les neuroscientifiques ont clairement montré que le cerveau dispose d'une grande capacité d'adaptation aux demandes de son environnement : la plasticité. Des connexions neuronales sont créées ou renforcées, d'autres sont affaiblies ou éliminées. La plasticité est une caractéristique fondamentale du cerveau tout au long de la vie. Malgré la plasticité permanente, il existe des périodes idéales ou « sensibles » durant lesquelles un apprentissage donné présentera une efficacité maximale. Pour les stimuli sensoriels (tels les sons du langage) et pour certaines expériences émotionnelles et cognitives (telle l'exposition à une langue), les périodes sensibles sont assez brèves et se situent à un âge assez jeune. D'autres compétences (comme l'acquisition de vocabulaire) ne connaissent pas de période sensible et peuvent être apprises de façon optimale tout au long de la vie.

Les images de cerveaux d'adolescents montrent qu'ils sont loin d'être arrivés à maturité, et qu'ils subissent d'importantes modifications structurelles bien après la puberté. L'adolescence est une période fondamentale pour le développement émotionnel, en raison de la grande quantité d'hormones présentes dans le cerveau; l'immaturité du cortex préfrontal des adolescents joue sans doute un rôle crucial dans l'instabilité de leur comportement. Chez les adultes plus âgés, l'aisance ou l'expérience dans une tâche peut réduire le niveau d'activité cérébrale : on peut considérer cela comme une preuve d'un traitement plus efficace. Mais le cerveau décline quand on l'utilise moins, ainsi que quand on vieillit. Des études ont montré qu'apprendre peut limiter le déclin cérébral : plus les personnes d'âge mûr ont l'occasion d'apprendre, plus elles ont de chances de retarder l'apparition de maladies neurodégénératives, ou d'en limiter le développement.

Comprendre comment le cerveau apprend et mûrit peut informer des approches d'enseignement/apprentissage plus adaptées aux différents groupes d'âges, et donc plus efficaces. Une connaissance des processus de vieillissement dans le cerveau peut aider tout un chacun à conserver des fonctions cognitives performantes tout au long de la vie. Une conception de l'apprentissage informée par la science est en train d'émerger. C'est un pas d'une importance cruciale.

Références

Action Medical Research (2005), « Speech and Language in Children Born Preterm », *www.action.org.uk/research_projects/grant/261/*.

Allgood-Merten, B., P.M. Lewinsohn et H. Hops (1990), « Sex Differences in Adolescent Depression », *Journal of Abnormal Psychology*, vol. 99, nº 1, pp. 55-63.

Anderson, B.J., D.N. Rapp, D.H. Baek, D.P. McCloskey, P.S. Coburn-Litvak et J.K. Robinson (2000), « Exercise Influences Spatial Learning in the Radial Arm Maze », Physiol Behav, vol. 70, nº 5, pp. 425-429.

Baird, A.A., S.A. Gruber, D.A. Fein, L.C. Maas, R.J. Steingard, P.F. Renshaw, B.M. Cohen et D.A. Yurgelun-Todd (1999), « Functional Magnetic Resonance Imaging of Facial Affect Recognition in Children and Adolescents », *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, vol. 38, nº 2, pp. 195-199.

BBC News (2005), « Meditation Brain Training Clues », 13 juin, *http://news.bbc.co.uk/2/hi/health/4613759.stm*.

Bjork, J.M., B. Knutson, G.W. Fong, D.M. Caggiano, S.M. Bennett et D.W. Hommer (2004), « Incentive-Elicited Brain Activation in Adolescents: Similarities and Differences from Young Adults », *Journal of Neuroscience*, vol. 24, nº 8, pp. 1793-1802.

Blanton, R.E., J.G. Levitt, J.R., D., M.L.Sporty, M. Lee, D. To, E.C. Mormino, P.M. Thompson, J.T. McCracken et A.W. Toga (2004), « Gender Differences in the Left Inferior Frontal Gyrus in Normal Children », *Neuroimage*, vol. 22, nº 2, pp. 626-636.

Bruer, J.T. (1999), *The Myth of the First Three Years*, Free Press, New York.

Cheour, M., O. Martynova, R. Näätänen, R. Erkkola, M. Sillanpää, P. Kero, A. Raz, M.-L. Kaipio, J. Hiltunen, O. Aaltonen, J. Savela et H. Hämäläinen (2002a), « Speech Sounds Learned by Sleeping Newborns », *Nature*, vol. 415, nº 6872, pp. 599-600.

Cheour, M., A. Shestakova, P. Alku, R. Ceponiene et R. Naatanen (2002b), « Mismatch Negativity Shows that 3-6-year-old Children Can Learn to Discriminate Non-native Speech Sounds within Two Months », *Neuroscience Letters*, vol. 325, nº 3, pp. 187-190.

Coffield (2005), « It takes two to tango », article rédigé à la demande du CERI pour la 4e réunion du CERI's Lifelong Learning Network, Wako-shi, 2004.

Dehaene, S. (1997), *The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics*, Oxford University Press, New York.

Giedd, J.N. (2004), « Structural Magnetic Resonance Imaging of the Adolescent Brain », *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1021, pp. 77-85.

Giedd, J.N., J. Blumenthal, N.O. Jeffries, F.X. Castellanos, H. Liu, A. Zijdenbos, T. Paus, A.C. Evans et J.L. Rapoport (1999), « Brain Development during Childhood and Adolescence: A Longitudinal MRI Study », *Nature Neuroscience*, vol. 2, pp. 861-863.

Gopnik, A. (2000), « Cognitive Development and Learning Sciences: State of the Art », présentation au premier forum du CERI sur « Brain Mechanisms and Early Learning », Sackler Institute, New York, 17 juin.

Goswami, U. (2004), « Neuroscience, Education and Special Education », *British Journal of Special Education*, vol. 31, nº 4, pp. 175-183.

Greenwood, P.M., T. Sunderland, J. Friz et R. Parasuraman (2000), « Genetics and Visual Attention: Selective Deficits in Healthy Adult Carriers of the e4 Allele of the Apolipoprotein E gene », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 97, pp. 11661-11666.

Hoyert, D.L., K.D. Kochanek et S.L. Murphy (1999), *National Vital Statistics Report Volume 47, Number 19. Deaths: Final Data for 1997*, Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Health Statistics, National Vital Statistics System, Hyattsville, MD.

Johnson, M.H. (1997), *Developmental Cognitive Neuroscience: An Introduction*, Blackwell, Oxford.

Kandel, E.R., J.H. Schwartz et T.M. Jessell (1991), *Principles of Neural Science*, Appleton and Lance, Norwalk, Connecticut, troisième édition.

Kashani, J.H. et D.D. Sherman (1988), « Childhood Depression: Epidemiology, Etiological Models, and Treatment Implications », *Integrated Psychiatry*, vol. 6, pp. 1-8.

Kato, H., M. Izumiyama, H. Koizumi, A. Takahashi et Y. Itoyama (2002), « Near-infrared Spectroscopic Topography as a Tool to Monitor Motor Reorganisation after Hemiparetic Stroke: A Comparison with Functional MRI », *Stroke*, vol. 33, nº 8, pp. 2032-2036.

Kawashima, R., K. Okita, R. Tamazaki, N. Tajima, H. Yoshida, M. Taira, K. Iwata, T. Sasaki, K. Maeyama, N. Usui et K. Sugimoto (2005), « Reading Aloud and Arithmetic Calculation Improve Frontal Function of People with Dementia », *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, vol. 60, pp. 380-384.

Koizumi, H. (2002), « The Scope of the Symposium 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain », 2-6 juin, Sendai, Japon.

Koizumi, H. (2003), « Science of Learning and Education: An Approach with Brain-function Imaging », *No To Hattatsu*, vol. 35, n° 2, pp. 126-129.

Koizumi, H. (2004), « The Concept of Developing the Brain: A New Natural Science for Learning and Education », Brain and Development, vol. 26, n° 7, pp. 434-441.

Kozorovitsky, Y., C.G. Gross, C. Kopil, L. Battaglia, M. McBreen, A.M. Stranahan et E. Gould (2005), « Experience Induces Structural and Biochemical Changes in the Adult Primate Brain », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102, n° 48, pp. 17478-17482.

Kuhl, P.K. (1979), « Speech Perception in Early Infancy: Perceptual Constancy for Spectrally Dissimilar Vowel Categories », *Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 66, pp. 1668-1679.

Lipton, L. (2001), « Schizophrenia: A "Wave" of Cortical Changes », *Neuropsychiatry Reviews*, vol. 2, n° 8, octobre.

Maguire, E.A., D.G. Gadian, I.S. Johnsrude, C.D. Good, J. Ashburner, R.S. Frackowiak et C.D. Frith (2000), « Navigation-related Structural Change in the Hippocampi of Taxi Drivers », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 97, n° 8, pp. 4398-4403.

McCandliss (2000), « Cortical Circuitry of Word Reading », présentation au premier forum du CERI sur « Brain Mechanisms and Early Learning », Sackler Institute, New York, 17 juin.

McCrink K. et K. Wynn (2004), « Large-number Addition and Subtraction by 9-month-old in Infants », *Psychological Science*, vol. 15, pp. 776-781.

Moffitt, T.E. (1993), « Adolescence-Limited and Life-Course-Persistent Antisocial Behaviour: A Developmental Taxonomy », *Psychological Review*, vol. 100, n° 4, pp. 674-701.

Neville, H. (2000), « Brain Mechanisms of First and Second Language Acquisition », présentation au premier forum du CERI sur « Brain Mechanisms and Early Learning », Sackler Institute, New York City, 17 juin.

New York Times (2003), « Is Buddhism Good for Your Health? », S.S. Hall, 14 septembre.

Nolen-Hoeksema, S. et J.S. Girgus (1994), « The Emergence of Gender Differences in Depression during Adolescence », *Psychological Bulletin*, vol. 115, n° 3, pp. 424-443.

OCDE (2000), Rapport sur le premier forum sur « Brain Mechanisms and Early Learning » au Sackler Institute, New York, États-Unis, 16-17 juin.

OCDE (2001), Rapport sur le second forum sur « Brain Mechanisms and Youth Learning » à l'Université de Grenade, Grenade, Espagne, 1-3 février.

OCDE (2002), « Learning Sciences and Brain Research: Report of the Launching Meeting of Phase II », Royal Institution, Londres, 29-30 avril, pp. 7-8, *www.oecd.org/dataoecd/40/36/15304667.pdf*

OCDE (2005), Rapport sur la troisième réunion du « Lifelong Learning Network », 20-22 janvier 2005, Wako-shi, Japon.

Organisation mondiale de la santé (2001), *World Health Report: Mental Health, New Understanding, New Hope*, OMS, Genève.

Park, D.C., T. Polk, J. Mikels, S.F. Taylor et C. Marshuetz (2001), « Cerebral Aging: Integration of Brain and Behavioral Models of Cognitive Function », *Dialogues in Clinical Neuroscience*, vol. 3, pp. 151-165.

Pena, M., A. Maki, D. Kovacic, G. Dehaene-Lambertz, H. Koizumi, F. Bouquet et J. Mehler (2003), « Sounds and Silence: An Optical Topography Study of Language Recognition at Birth », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 100, n° 20, pp. 11702-11705.

Polk, T.A. et M. Farah (1995), « Late Experience Alters Vision », *Nature*, vol. 376, n° 6542, pp. 648-649.

Sebastián Gallé Núria (2004), « A Primer on Learning: A Brief Introduction from the Neurosciences », extrait de sa présentation à la « Social Brain Conference » tenue à Barcelone, 17-20 juillet, *www.ub.es/pbasic/sppb/*.

Servan-Schreiber, D. (2000), au Forum sur « Brain Mechanisms and Early Learning » au Sackler Institute, New York, États-Unis, 16 juin.

Simos, P.G. et D.L. Molfese (1997), « Electrophysiological Responses from a Temporal Order Continuum in the Newborn Infant », *Neuropsychologia*, vol. 35, pp. 89-98.

Steinberg, L. (2004), « Risk Taking in Adolescence: What Changes, and Why? », *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1021, pp. 51-58.

Stevens, B. et R.D. Fields (2000), « Response of Schwann Cells to Action Potentials in Development », *Science*, vol. 287, n° 5461, pp. 2267-2271.

Tatsumi, I. (2001), « A PET Activation Study on Retrieval of Proper and Common Nouns in Young and Elderly People », Troisième forum, Tokyo, Japon, 26/27 avril.

Terry, R.D., R. DeTeresa et L.A. Hansen (1987), « Neocortical Cell Counts in Normal Human Adult Ageing », *Annuals of Neurology*, vol. 21, n° 6, pp. 530-539.

Tisserand, D.J., H. Bosma, M.P. van Boxtel et J. Jolles (2001), « Head Size and Cognitive Ability in Nondemented Older Adults are Related », *Neurology*, vol. 56, n° 7, pp. 969-971.

Tisserand, D.J., J.C. Pruessner, E.J. Sanz Arigita, M.P. van Boxtel, A.C. Evans, J. Jolles et H.B. Uylings (2002), « Regional Frontal Cortical Volumes Decrease Differentially in Aging: An MRI Study to Compare Volumetric Approaches and Voxel-based Morphometry », *Neuroimage*, vol. 17, n° 2, pp. 657-669.

US National Research Council (1999), *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*, J.D. Bransford, A.L. Brown et R.R. Cocking (éd.), National Academy Press, Washington DC.

Wallis, C., K. Dell et A. Park (2004), « What Makes Teens Tick; A Flood of Hormones, Sure », *Time Magazine*, 10 mai.

Werker, J.F. et R.C. Tees (2002), « Cross-language Speech Perception: Evidence for Perceptual Reorganization during the First Year of Life », *Infant Behavior and Development*, vol. 25, pp. 121-133.

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE I

Chapitre 3

L'impact de l'environnement sur l'apprentissage

On ne naît pas homme, on le devient.

Erasme

Ce chapitre aborde les éléments émanant de la recherche sur le cerveau qui aident à comprendre comment les processus d'apprentissage sont influencés par divers facteurs environnementaux, dont le milieu social et les interactions, la nutrition, l'exercice physique, et le sommeil. Il traite également des facteurs clés que sont les émotions et la motivation, liant aux questions éducatives ce qui est connu grâce à la neuroscience. Une telle information est importante pour les parents et les enseignants qui tiennent un rôle primordial dans l'environnement d'apprentissage des enfants. Elle est également pertinente pour les décideurs politiques qui souhaitent créer et développer un environnement d'apprentissage positif.

Ce chapitre s'intéresse aux différentes façons de stimuler le cerveau, afin de maximiser les capacités d'apprentissage tout au long de la vie. De récentes découvertes en neurosciences ont montré que stimuler le cerveau est très important pour le processus d'apprentissage, ce qui va probablement permettre d'éclairer décideurs politiques et praticiens quant aux moments les plus adaptés aux différents types d'apprentissage. La plupart des façons de stimuler le cerveau dépendent de facteurs simples et quotidiens, comme la qualité de l'environnement mental et physique – très importante mais mal prise en compte par les pratiques éducatives actuelles. En prêtant attention à l'état de notre cerveau et de notre corps, il est possible de mettre à profit la plasticité cérébrale et de faciliter l'apprentissage. Des recherches plus poussées pourraient contribuer à améliorer la conception des programmes et la formation des enseignants.

Le but de ce chapitre est de mettre en évidence les éléments communs qui facilitent souvent les processus d'apprentissage, mais la façon optimale de nourrir le cerveau n'est pas forcément la même pour tous les individus. En effet, le cerveau est un organe actif, et sa plasticité lui permet de s'adapter à l'environnement tout au long de la vie. Chaque individu présente des caractéristiques génétiques spécifiques, et connaît un environnement unique : tous les cerveaux sont donc différents. De plus, il existe une relation circulaire entre expérience et structure cérébrale : l'expérience entraîne des modifications structurelles, qui à leur tour influencent les effets que les expériences ultérieures ont sur le cerveau. En d'autres termes, le cerveau subit tout au long de la vie un processus de réorganisation dépendante de l'expérience.

Les différences individuelles dans les expériences d'apprentissage résultent d'une interaction génétique et épigénétique continuelle et cumulative. Tout au long de la vie, l'environnement influence l'expression des gènes qui concernent l'apprentissage, ce qui peut entraîner des changements dans la structure du cerveau. Ces changements influent à leur tour sur la façon dont les gènes s'expriment. Ainsi, le cerveau de chacun accumule des particularités qui jouent un rôle dans les processus d'apprentissage. Concrètement, cela implique qu'il est difficile de décrire un environnement d'apprentissage idéal pour l'ensemble des gens et que, si de bonnes pratiques sont utiles pour tout le monde, elles ne seront pas forcément aussi efficaces pour chacun[1]. L'importance de l'environnement d'apprentissage ne doit pas être sous estimée, et les différences individuelles dépendent fortement de l'expérience et des types d'apprentissage. Les futurs programmes de recherche doivent s'intéresser aux types d'apprentissage qui peuvent influencer le cerveau et les comportements, et prendre en compte les différences individuelles, les façons d'apprendre et les besoins. Il ne faut pas perdre de vue les différences individuelles lorsqu'on étudie les diverses façons de stimuler le cerveau à chaque étape de la vie.

1. Par exemple, l'étude diachronique sur le vieillissement réalisée à Maastricht (Pays-Bas) a montré qu'il existe d'importantes différences individuelles quant à la façon dont les diverses fonctions mémorielles se détériorent, et que le niveau de formation a bien plus de conséquences que l'âge sur les performances.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Encadré 3.1. **Nutrition**

L'importance du régime alimentaire est évidente quant à la santé et au bon fonctionnement des êtres humains. Ce régime a des répercussions immédiates sur la santé physique et notamment sur le fonctionnement cérébral. Il semble alors possible d'optimiser les capacités d'apprentissage grâce à un régime alimentaire adapté et adéquat.

Aux États-Unis, des chercheurs ont étudié les effets du petit-déjeuner donné à l'école sur les résultats scolaires de 1 023 élèves socialement défavorisés de 8 à 10 ans : ils ont nettement amélioré leurs résultats aux tests standardisés et ont progressé en mathématiques, lecture et vocabulaire. Absences et retards étaient moins fréquents (Meyers et autres, 1989). Dans les écoles primaires du Minnesota, un programme pilote mené sur trois ans a entraîné une hausse des résultats en mathématiques et en lecture, une amélioration du comportement des élèves, une baisse de l'absentéisme et des visites matinales à l'infirmerie (Minnesota Department of Children, Families and Learning, 1988). Une autre étude a consisté a faire prendre à 29 enfants un petit-déjeuner différent chaque jour pendant quatre jours (céréales, boisson sucrée ou rien du tout). On leur a fait passer des tests sur ordinateur portant sur l'attention, la mémoire de travail et la mémoire secondaire : avant le petit-déjeuner, puis après 30, 90, 150 et 210 minutes. Le petit-déjeuner constitué d'une boisson sucrée (tout comme l'absence de petit-déjeuner) était suivi d'un déclin de l'attention et de la mémoire, mais la baisse des performances était considérablement moindre après un petit-déjeuner à base de céréales. Cette étude prouve qu'un petit-déjeuner classique, riche en sucres lents, aide à maintenir le même niveau de performances mentales au cours de la matinée (Wesnes et autres, 2003).

Il est donc primordial de tenir compte des besoins nutritionnels tout au long de la journée et de répartir les apports en fonction de ces besoins. Au delà de cette juste répartition, 39 éléments identifiés comme indispensables au bon fonctionnement de l'organisme doivent être fournis par l'alimentation (OCDE, 2003b).

Une récente découverte a confirmé le bénéfice engendré par la traditionnelle cuillerée d'huile de foie de morue. En effet, cette « potion », comme d'autres huiles de poisson, est particulièrement riche en acides gras hautement insaturés (AGHI), souvent appelés acides gras oméga-3. Ceux-ci semblent très importants pour l'équilibre hormonal et le système immunitaire, tous deux nécessaires à la bonne santé du cerveau. Aujourd'hui, beaucoup de gens ont un régime alimentaire relativement pauvre en acides gras, alors que ceux-ci sont indispensables au développement et au fonctionnement normaux du cerveau. Bien qu'il faille rester modéré face à la vague actuelle d'engouement autour des oméga-3 (tant que des études cérébrales approfondies n'ont pas apporté de preuves suffisantes de leur efficacité), des tests aléatoires sur la prise de suppléments nutritionnels contenant des oméga-3 et des oméga-6 ont été réalisés sur 117 enfants de 5 à 12 ans souffrant de dyspraxie développementale (aussi appelée trouble développemental de la coordination ou TDC). Aucun effet n'a été observé sur les capacités motrices, mais après trois mois le comportement ainsi que les résultats en lecture et en orthographe ont été nettement améliorés par rapport au groupe témoin qui recevait des placebos. Un apport supplémentaire en acides gras peut donc constituer un traitement efficace et sans danger pour remédier aux problèmes éducatifs et comportementaux des enfants atteints de TDC (Richardson et Montgomery, 2005).

Une autre étude, effectuée dans les prisons britanniques, a testé empiriquement si un apport approprié en vitamines, minéraux et acides gras essentiels entraînait une réduction du comportement antisocial – y compris de la violence. C'est effectivement le cas. Cette découverte est potentiellement applicable à ceux dont le régime alimentaire n'est pas adapté (Gesch et autres, 2002).

Encadré 3.1. **Nutrition** *(suite)*

On dispose de preuves scientifiques indiquant qu'un régime riche en acides gras essentiels, et la prise d'un bon petit-déjeuner, participent à la bonne santé du cerveau et améliorent l'apprentissage, mais l'information n'a semble-t-il pas été clairement transmise aux décideurs politiques qui seraient à même d'aider à la mettre en pratique dans la population. Il est donc nécessaire d'élargir le spectre des recherches et d'appliquer les découvertes au domaine éducatif.

La promotion d'un mode de vie sain devrait faire partie de la mission fondamentale de l'école : apprendre aux élèves à devenir des adultes sains et productifs afin qu'ils augmentent leurs capacités d'apprentissage; réduire l'absentéisme; améliorer leur forme physique et mentale. On devrait encourager proviseurs, directeurs, professeurs, travailleurs sociaux et parents à rechercher activement des informations sur l'importance de la nutrition pour la santé et la réussite scolaire des enfants.

La rupture récente des neurosciences avec la tradition cartésienne remet en cause une dissociation absolue entre corps et esprit (Damasio, 1994). La santé physique et les états corporels auraient une influence directe sur les capacités mentales et réciproquement. Il s'agit donc de tenir compte de ce lien, et des facteurs environnementaux agissant directement sur l'un ou l'autre, dans les pratiques éducatives.

Interactions sociales

Les interactions sociales ont un impact direct sur la capacité du cerveau à apprendre de manière optimale. L'importance des influences sociales positives et leurs conséquences sur la physiologie et le comportement ont été établies.

Depuis une vingtaine d'années, on reconnaît de plus en plus l'importance de la communication et de l'interaction sociale pour les bébés. Si les apprentissages du début de la vie semblent automatiques, ils nécessitent malgré tout un environnement naturellement riche et stimulant. Les contacts sociaux semblent fondamentaux (Blakemore et autres, 2004). On s'est également aperçu que, dans les orphelinats roumains, le manque d'apport émotionnel entraîne des troubles de l'attachement (O'Connor et autres, 1999). Une autre étude s'est intéressée à des enfants élevés dans des conditions totalement aberrantes, privés de tout ce qui fait partie de ce qu'on considère généralement comme les besoins essentiels en matière d'éducation, et a montré que cela peut produire des changements quasi-permanents dans la chimie cérébrale de ces enfants, par exemple dans la production d'hormones comme l'ocytocine[2], cruciales pour l'interaction sociale et l'établissement de liens affectifs. Ces découvertes corroborent l'idée selon laquelle les expériences sociales des premières années de la vie jouent un rôle critique dans le développement des systèmes cérébraux liés au comportement social (Fries et autres, 2005).

Une discipline assez récente, la neuroscience socio-cognitive, s'intéresse au cerveau dans un contexte social. Elle explore les mécanismes neuraux à l'œuvre dans les processus

2. L'ocytocine joue un rôle fondamental dans les relations sociales et la régulation du comportement émotionnel. Des études animales ont montré que des expériences sensorielles agréables (contact ou odeur réconfortants) en stimulent la production. Plus cette hormone est présente chez les animaux, plus ils tissent de liens sociaux et plus ils s'attachent aux autres, et ces expériences sont conservées en mémoire.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

socio-cognitifs, entre deux personnes ou à l'intérieur d'un groupe plus important. Examiner simultanément au scanner le cerveau de deux individus – l'un des sujets se contentant de regarder l'autre faire quelque chose – permet de faire avancer la neuroscience et l'étude de la cognition. Ainsi, regarder quelqu'un effectuer des mouvements affecte le système moteur périphérique d'une manière qui correspond exactement aux muscles mobilisés (Fadiga et autres, 1995). L'étude de ce système de miroir est un exemple des tentatives pour identifier les activités neurophysiologiques qui permettent de comprendre ses propres actions, et les actions des autres. De tels mécanismes sont peut-être fondamentaux pour plusieurs processus sociaux supérieurs lors desquels les actions d'autrui sont interprétées de façon qu'elles influencent directement nos propres actions. C'est par exemple le cas lorsque nous attribuons des intentions (à autrui ou à nous-mêmes), lorsque nous imitons quelqu'un ou lorsque nous enseignons quelque chose (Blakemore et autres, 2004). Dans le même ordre d'idées, une étude sur l'empathie a consisté à scanner le cerveau de couples dans des conditions strictement contrôlées : une personne subissait un choc électrique tandis que le cerveau du partenaire était observé par scanner. Les aires cérébrales activées par la douleur de l'autre correspondaient en partie à celles activées par une douleur directement ressentie (Singer et autres, 2004).

Comprendre et observer les actions d'autrui pourrait favoriser l'apprentissage et influencer l'éducation. Mais dans ce domaine, la recherche n'en est qu'à ses débuts. De nouvelles études permettraient de déterminer quel type d'apprentissage nécessite le plus d'interactions sociales, de savoir quelles émotions sont les plus présentes dans le cerveau, et d'examiner les différences culturelles. La neuroscience sociale serait sans doute à même de préciser le rôle de l'enseignant, d'indiquer les méthodes d'enseignement les plus favorables à l'apprentissage et d'étudier la place des media, par exemple, sur les émotions et l'apprentissage de la socialisation. La neurobiologie a montré que les capacités intellectuelles des élèves sont influencées par leur état de santé. Parents, professeurs, travailleurs sociaux et décideurs politiques devraient donc prêter attention au fait que la santé des élèves est d'une importance fondamentale pour leurs résultats scolaires. Il est absolument crucial de prendre en compte les facteurs sociaux qui déterminent le contexte émotionnel dans lequel a lieu l'apprentissage.

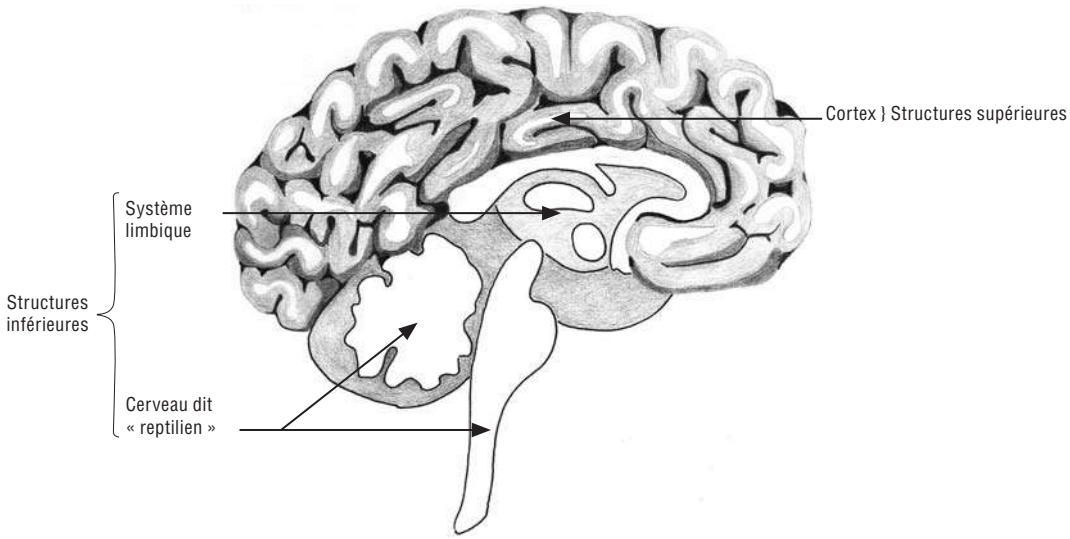
Régulation des émotions

Au centre du cerveau humain se trouve un ensemble de structures appelé « système limbique » (voir le graphique 3.1), dont deux éléments importants sont l'amygdale et l'hippocampe[3]. Cette zone du cerveau, historiquement appelée « cerveau émotionnel », est connectée au cortex frontal. En cas de stress excessif et/ou de peur intense, le jugement social et les performances cognitives semblent moins efficaces, parce que les aspects émotionnels de l'apprentissage (y compris la réaction face aux récompenses et au risque) sont compromis.

Comme le disait déjà Platon, « tout apprentissage repose sur les émotions ». De plus, on sait depuis peu que nos émotions agissent concrètement sur la structure des tissus neuraux. Les experts en neurosciences et en sciences de l'éducation considèrent

3. L'amygdale est un groupe de neurones qui a la taille et la forme d'une amande, d'où son nom. L'hippocampe est un groupe de neurones qui a (approximativement) la forme… d'un hippocampe, d'où son nom.

Graphique 3.1. **Structure interne du cerveau humain, comprenant le système limbique**



Source : Odile Pavot pour l'OCDE.

aujourd'hui l'apprentissage comme un échange complexe entre éléments cognitifs, émotionnels et physiologiques. La distinction entre ces trois types d'éléments est utile pour la réflexion mais heuristique pour les fonctions cérébrales comme pour l'expérience d'apprentissage[4].

Les émotions sont une partie importante et incontournable de la vie et de l'apprentissage. Pour apprendre efficacement, il est très utile de savoir gérer ses émotions. La régulation émotionnelle opère *via* des processus complexes qui vont bien au-delà de la simple expression d'émotions. Elle intervient dans la façon dont les émotions guident ou perturbent les processus psychologiques tels que la concentration, facilitent la résolution de problèmes et facilitent les relations humaines (Cole et autres, 2004). Selon David Servan-Schreiber, « la compétence ou intelligence émotionnelle, c'est pouvoir s'autoréguler, c'est-à-dire réfréner ses impulsions et ses instincts, mais c'est aussi être capable de compassion, et savoir coopérer » (OCDE, 2002b).

4. L'exemple qui suit illustre les interactions entre cognition et émotions : au collège, un professeur rend à Joël sa copie corrigée. Un « 3/20 » lui saute au visage, et déclenche un va-et-vient entre les aires cérébrales dédiées aux processus cognitifs et émotionnels. Joël fait appel aux structures corticales pour évaluer la situation : cette mauvaise note va à l'encontre de ses objectifs (réussir à l'école, faire plaisir à sa mère et la convaincre qu'il mérite une planche de surf pour son anniversaire). Presque en même temps, les régions limbiques (amygdale) et paralimbique (insula) déclenchent une réaction émotionnelle, et Joël ressent des émotions négatives, mais entreprend d'analyser la situation d'un point de vue cognitif : il s'en détache en se disant que les autres élèves ont également connu des difficultés. Il réévalue et réinterprète les faits : ce contrôle n'aura qu'une influence relative sur sa moyenne. Ces stratégies de régulation correspondent à un regain d'activité des régions cérébrales impliquées dans le contrôle cognitif, et à une baisse d'activité dans les régions concernées par les réactions émotionnelles négatives (l'amygdale). Ce système de régulation agit sur la réaction émotionnelle et renforce l'idée (cognitive) qu'il est capable de faire face à la situation. Le rôle joué par le cortex renforce l'expérience et contribue à relativiser la réaction émotionnelle.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

La régulation émotionnelle n'a pas encore de définition universellement acceptée :

- Thompson (1994) a proposé : « les processus extrinsèques et intrinsèques qui enregistrent, évaluent et modifient les réactions émotionnelles afin d'atteindre les buts qu'on s'est fixés. »
- Gros (2003) l'a définie à son tour comme les processus par lesquels les individus influent sur les émotions qu'ils ressentent, le moment où ils les ressentent, la façon dont ils les ressentent et dont ils les manifestent. Dans ce cas, la régulation des émotions comprend la façon dont on les gère, la régulation et l'apaisement de l'humeur, les mécanismes de défense et la régulation de l'affect.
- Cole et autres (2004) l'ont définie comme « l'interaction dynamique entre plusieurs systèmes comportementaux, psycho-physiologiques, attentionnels et affectifs, qui permet à de jeunes enfants de participer efficacement à leur environnement social ». Cette définition fait référence à un processus distinct de l'activation émotionnelle.

Si la régulation émotionnelle peut être mesurée indépendamment de l'émotion elle-même, cela devrait pouvoir s'observer au niveau cérébral. Les neuroscientifiques ont essayé d'étudier cela en isolant le rôle du cortex préfrontal dans le traitement des émotions (Ochsner et autres, 2004 ; Eippert et autres, 2006). Des études du cortex préfrontal lorsque les sujets éprouvent diverses émotions à divers degrés révèlent des schémas d'activation dans l'amygdale (Lewis et Stieben, 2004). Il est donc possible à présent d'observer, et donc potentiellement de mieux comprendre les différences individuelles et le développement, au cours du temps, de la régulation émotionnelle. Auparavant, la recherche dans ce domaine dépendait principalement des descriptions que parents et enseignants faisaient des processus comportementaux des enfants. L'arrivée de la neuroscience va permettre d'identifier de nouvelles façons de mesurer la régulation des émotions.

Les états émotionnels dus à la peur ou au stress peuvent affecter directement l'apprentissage et la mémoire. Des études ont montré qu'un certain niveau d'émotions négatives perturbe voire empêche l'apprentissage. Elles ont aussi déterminé que l'amygdale, l'hippocampe et les hormones du stress (glucocorticoïdes, épinéphrine et norépinéphrine) jouent un rôle fondamental dans la régulation de ces émotions. Le rythme cardiaque augmente, ainsi que la transpiration et le taux d'adrénaline (Damasio, 1994; LeDoux, 2000), ce qui influence l'activité corticale. Ces études indiquent qu'un certain niveau de stress est nécessaire à une adaptation optimale à l'environnement, et peut permettre un meilleur apprentissage; mais au-delà d'une certaine limite, il peut devenir néfaste sur les plans physique et mental.

Le stress est provoqué par de fortes demandes concernant les systèmes moteurs et cognitifs, et on le ressent sur le plan émotionnel. Par exemple, si on croise dans la rue un homme armé et masqué (situation perçue comme potentiellement dangereuse et généralement considérée comme stressante), notre cerveau s'aperçoit rapidement du danger et prépare les systèmes cognitif et moteur pour la survie. Le stress se manifeste par diverses réactions. La vigilance et l'attention sont exacerbées, et le corps se prépare à combattre ou à fuir (« *fight or flight* »). Le rythme cardiaque et la pression sanguine augmentent, les processus liés à la digestion, la croissance ou la reproduction ralentissent (ces fonctions n'étant pas nécessaires à la survie immédiate dans une telle situation : elles peuvent donc être mises en veilleuse sans dommage). Cette réaction de stress est déclenchée par des hormones : en quelques millièmes de seconde, épinéphrine et norépinéphrine sont secrétées, suivies du cortisol quelques secondes plus tard. Des études

Encadré 3.2. **Les aspects organiques de l'attention**

La psychologie et les sciences de l'éducation se sont toujours intéressées à l'attention, qui est liée aux mécanismes d'expérience subjective et de contrôle délibéré. Mais seule l'arrivée de la neuroimagerie a permis d'analyser l'attention en tant que système organique et anatomique. Des études d'imagerie cérébrale ont montré que les diverses fonctions de l'attention (maintenir l'esprit en éveil, gérer l'information sensorielle et arbitrer entre plusieurs pensées ou plusieurs sentiments) sont gérées par des réseaux d'aires cérébrales distincts. Que convient-il d'entendre exactement par « réseau »? En fait, l'exécution d'une tâche, même élémentaire, requiert que des aires cérébrales distinctes collaborent. Chacune s'occupe d'un élément précis, et l'ensemble permet d'exécuter la tâche globale. Toutes ces activations cérébrales, et leurs connections, constituent le réseau à l'œuvre dans l'exécution de la tâche.

Les réseaux dédiés à l'attention ont cette particularité que leur but premier est d'influencer le fonctionnement d'autres réseaux cérébraux. Il est établi que cette influence peut s'exercer dans la plupart des aires cérébrales (entre autres le cortex sensoriel primaire, le système limbique et le cortex moteur), mais leur source est nettement plus restreinte.

La gestion des stimuli sensoriels est celui des réseaux dédiés à l'attention qu'on a le plus étudié. Le consensus quant au groupe d'aires cérébrales permettant d'amplifier les signaux sensoriels est frappant. On s'accorde à dire que la zone frontale de la vision, avec les aires pariétales supérieures et inférieures, constitue le cœur de ce réseau. Des études ont également indiqué le rôle d'aires sous-corticales (dont le pulvinar du thalamus et le colliculus supérieur). La plupart des études utilisaient des stimuli visuels, mais les sources de l'attribution de l'attention en jeu pour d'autres types de stimuli sont assez similaires. En revanche, le lieu où se produit l'amplification du message sensoriel varie nettement selon la nature du stimulus.

On pense aujourd'hui que le maintien de l'attention durant la réalisation d'une tâche (tonique), tout comme les changements induits par un signal d'alerte, mettent en jeu la même structure sous-corticale, le locus coeruleus, source de la production de norépinéphrine dans le cerveau. Des preuves concordantes indiquent que l'état tonique dépend de l'intégrité de l'hémisphère droit. Si celui-ci est lésé ou endommagé, il peut être extrêmement difficile de réagir face à des éléments inattendus. La neuroimagerie semble montrer que les signaux d'alerte peuvent influencer plus fortement l'hémisphère gauche.

Les tâches qui créent un conflit entre plusieurs stimuli cherchant à déterminer la réaction du sujet déclenchent souvent une activation du gyrus cingulaire antérieur et des aires préfrontales latérales. On pense que ce conflit est représentatif de situations dans lesquelles différents réseaux neuraux rivalisent pour prendre le contrôle de la conscience ou de la réaction. C'est pour cela qu'on emploie le terme « d'attention exécutive »; le réseau régule l'activité d'autres réseaux impliqués dans la pensée et l'émotion. Ce réseau se développe beaucoup durant l'enfance, et sa maturation est liée à ce que la psychologie du développement a appelé « l'autorégulation ». Il est crucial pour la réussite scolaire de l'enfant.

On observe toujours des différences individuelles dans les tâches cognitives mettant en jeu l'attention du sujet. On a mis au point un test adapté, afin d'explorer l'efficacité de chacun des trois réseaux. On pense aujourd'hui que chacun est anatomiquement distinct, dispose de ses propres neuromodulateurs chimiques, et se développe à des rythmes différents. Des études récentes ont cherché à savoir en quoi les différents allèles de gènes précis contribuent à rendre les réseaux plus ou moins efficaces; d'autres études portent sur la possibilité d'améliorer ces réseaux par l'entraînement.

Étudier l'attention d'un point de vue organique va permettre de mieux comprendre les divers types d'atteintes cérébrales et de pathologies qui entraînent des troubles de l'attention.

Source : Michael Posner, Université d'Oregon.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

ont montré que ces hormones agissent sur le cerveau et modulent la cognition, agissant notamment sur la mémoire et l'apprentissage[5]. Il est rare de voir un homme armé dans une salle de classe. Mais d'autres éléments stressants, même si moins extrêmes, peuvent intervenir : un enseignant agressif, des élèves violents, voire un matériel pédagogique incompréhensible (livres ou ordinateurs). Si un élève se retrouve face à une situation qui génère chez lui du stress ou de la peur, ses fonctions cognitives sont affectées.

Il est nécessaire de réaliser d'autres études – en psychologie, neuropharmacologie et neuroimagerie – pour mieux connaître les mécanismes neurobiologiques qui sous-tendent les effets du stress sur l'apprentissage et la mémoire, ainsi que les méthodes de prévention et de régulation du stress. Pour mettre au point des méthodes de prévention, il faut étudier comment les individus arrivent à gérer les facteurs de stress pour conserver, voire améliorer, leurs performances cognitives. L'une des mesures préventives pourrait être l'activité physique (voir encadré 3.3). Une étude récente a montré que les sportifs de haut niveau réagissent moins violemment au stress sur les plans psychologique (ils sont moins anxieux et plus calmes) et physiologique (leur taux de cortisol est relativement bas) (Rimmele et autres, 2007b)[6]. Connaître les mécanismes neurobiologiques de la modulation de la mémoire par les hormones de stress et l'amygdale, ainsi que les possibilités de manipulations physiologiques et cognitives pourrait se révéler très important dans un contexte éducatif pour une société où les influences négatives – notamment *via* les médias –peuvent mettre à mal la stabilité émotionnelle des enfants (voire des adultes) et leur causer des difficultés d'apprentissage.

Les recherches effectuées sur le cerveau (appuyées sur la psychologie cognitive et l'étude du développement de l'enfant) ont permis d'identifier une importante région cérébrale dont l'activité et le développement sont en relation avec les performances et le développement du self-control[7]. L'autorégulation est l'un des talents émotionnels et comportementaux les plus importants parmi ceux qui sont nécessaires à l'enfant dans ses environnements sociaux. La capacité à contrôler ses propres impulsions afin de retarder la

5. Les recherches sur le cortisol (hormone liée au stress) laissent penser – ce qui corroborerait les résultats d'études sur les animaux – que des taux de cortisol bas ou moyens améliorent la mémoire et l'apprentissage, alors que des taux élevés leur sont nuisibles (McEwen et Sapolsky, 1995). Cette hypothèse est soutenue par le fait que l'élévation du taux de cortisol (de façon extrême ou chronique, à cause d'un état de stress prolongé ou d'une maladie) entraîne des déficits cognitifs et des troubles de la mémoire chez l'animal comme chez l'homme (McEwen et Sapolsky, 1995).
6. Reste à voir si ce qui est observé chez des sportifs « de haut niveau » est généralisable aux joggeurs du dimanche…
7. À titre d'exemple, une expérience classique menée pour mesurer le contrôle cognitif est la « tâche de type Stroop ». Dans cette tâche, on montre au sujet des mots désignant des couleurs, imprimés dans une encre soit identique à la couleur désignée (par exemple, le mot « rouge » imprimé à l'encre rouge), soit dans une encre différente (par exemple, le mot « rouge » imprimé à l'encre bleue). Le sujet doit dire à haute voix quelle est la couleur de l'encre, ce qui est bien plus difficile lorsque le mot désigne une autre couleur que lorsqu'il désigne la même couleur. L'exécution d'une tâche de type Stroop a tendance à activer une région très précise du cerveau située sur la ligne médiane frontale, juste derrière le cortex orbito-frontal et baptisée cingulaire antérieur. Cette zone semble jouer un rôle critique dans les réseaux cérébraux responsables de la détection d'erreurs et de la régulation non seulement des processus cognitifs (comme dans la tâche Stroop décrite ci-dessus) mais aussi des émotions afin de parvenir à ce que l'on peut décrire comme le contrôle intentionnel ou volontaire du comportement (OCDE, 2002a).

Encadré 3.3. **Exercice physique**

Une étude cherchant à observer les effets d'un programme d'exercice aérobic chez les seniors a clairement montré que les bénéfices potentiels de l'exercice aérobic dépassent le cadre de la santé cardio-vasculaire et atteignent les capacités cognitives. Arthur Kramer, dans un programme de recherches, a demandé à des sujets de plus de 55 ans de marcher de plus en plus longtemps à chaque séance (Colcombe et Kramer, 2004). Il a alors observé une augmentation des activations des régions médio-frontale et pariétale supérieure, associées à la concentration et à l'attention spatiale. Il semble donc bien que, biologiquement, l'exercice physique soit bénéfique pour la santé cérébrale des seniors. Cette étude ciblait explicitement des personnes âgées en bonne santé, qui ne souffraient pas de syndromes cliniques, mais une méta-analyse des performances cognitives de personnes âgées a montré que les résultats allaient dans le même sens pour des personnes malades.

La recherche dans ce domaine peut aider à déterminer s'il est nécessaire d'intégrer davantage d'activités aérobic dans les programmes scolaires. Au Danemark, le Learning Lab a créé le Consortium sur le jeu et l'apprentissage (voir encadré 7.3), qui s'intéresse aux relations entre corps, esprit, cognition et apprentissage, et conseille une approche physique de l'apprentissage qui incorpore les activités physiques dans toutes les disciplines, au lieu de les confiner aux cours de gym.

L'activité physique améliore le contrôle des mouvements et la coordination motrice (équilibre, motricité globale, motricité fine et conscience du corps), ce qui est très important pour les troubles de l'apprentissage et de l'attention (Rudel, 1985; Nicolson, Fawcett et Dean, 1995; Roth et Winter, 1994). De même plusieurs études ont établi l'existence d'un lien entre différents aspects des développements moteur et langagier (Ruoho, 1990; Rintala et autres, 1998; Moser, 2001). Moser avance l'idée que les arguments en faveur de l'exercice physique peuvent être vus comme une tentative pour insister sur l'aspect corporel de tous les types de programmes éducatifs, de loisirs et même pour la vie quotidienne (Moser, 2004). À l'école, le corps est souvent confiné aux cours de gym, et les effets potentiellement bénéfiques du mouvement ne sont pas (ou pas assez) intégrés aux autres disciplines.

Comprendre comment l'exercice physique affecte les fonctions cérébrales permettra un jour d'optimiser la santé cognitive de chacun et de faire évoluer les programmes scolaires afin qu'ils prévoient une activité physique à des intervalles scientifiquement déterminés, qui permettront un apprentissage global et harmonieux. Mais d'ici là, une bonne aération devrait déjà offrir un bénéfice. Ouvrir les fenêtres de temps en temps, et ménager des pauses pour que chacun puisse s'étirer et respirer, ne nuiraient probablement pas aux performances des élèves.

gratification est l'un des aspects de la régulation émotionnelle dans un contexte social. Dans le domaine éducatif, cette autorégulation des émotions est d'une importance cruciale pour que l'enfant puisse devenir un adulte responsable et socialement adapté[8].

8. Des études par imagerie cérébrale montrent qu'au moins les deux tiers de la même aire cérébrale sont activés lorsqu'on perçoit une image ou lorsqu'on l'imagine. Les images mentales d'objets ou d'événements peuvent être traitées de façon très similaire à l'expérience perceptuelle elle-même. De plus, la visualisation mentale de stimuli négatifs (par exemple : un visage tuméfié et un corps calciné) entraîne des modifications du rythme cardiaque et de la conductivité de la peau. Les images mentales affectent donc le corps. On sait également que la visualisation mentale de stimuli négatifs active certaines aires cérébrales plus intensément que des stimuli neutres (par exemple une lampe ou une chaise). L'une des aires activées est l'insula antérieure, impliquée dans l'enregistrement de changements physiologiques dans l'organisme. Ces découvertes suggèrent qu'on peut altérer son état émotionnel en formant des images mentales bien précises. Certains chercheurs disent qu'il serait ainsi possible d'influencer beaucoup de fonctions corporelles, parmi lesquelles les systèmes immunitaire et endocrinien. Il serait utile d'élargir les résultats de ces études et d'utiliser la neuroimagerie pour étudier des techniques permettant de surmonter l'anxiété, de créer un environnement d'apprentissage favorable ou de renforcer les apprentissages. Cela pourrait déboucher sur des applications pratiques dans le champ éducatif.

Un nombre croissant d'éléments scientifiques vient soutenir l'hypothèse selon laquelle la régulation émotionnelle pourrait être un élément capital – peut-être même le plus important – de la compétence émotionnelle indispensable à toute interaction sociale dans les situations les plus stressantes. Pour apprendre à gérer les interactions stressantes et négatives, les enfants ne doivent pas seulement être capables de faire face à leurs propres sentiments d'anxiété ou de colère : ils doivent aussi maîtriser leurs réactions face aux émotions négatives d'autrui. C'est indispensable pour créer et conserver des relations sociales (Eisenberg et Fabes, 1992). Aujourd'hui, la plupart des études sur le développement de l'autorégulation émotionnelle concernent les bébés et les jeunes enfants, principalement parce que c'est la période de la vie où la maturation cognitive est la plus notable (Calkins, 2004). Durant la petite enfance, il est très important d'apprendre à interagir avec des personnes extérieures à la famille, et avec d'autres enfants. La compétence sociale est importante pour les enfants. En effet, elle joue un grand rôle dans la réussite sociale et scolaire (Carlton et Winsler, 1999). L'émergence de la régulation émotionnelle chez le jeune enfant est d'une importance vitale pour créer et conserver des relations positives avec ses camarades (Denham et autres, 2003).

Michael Posner (OCDE, 2002b) utilise le concept de « contrôle avec effort », qui désigne la capacité de l'enfant à autoréguler son comportement à l'école comme à la maison[9]. Le contrôle avec effort peut être évalué en synthétisant les réponses données par les parents à des questions portant sur la tendance de leur enfant à se concentrer sur une activité (capacité d'attention), à faire preuve de retenue (contrôle inhibiteur), à apprécier une stimulation de basse intensité (plaisir de basse intensité) et à montrer sa conscience des changements subtils ayant affecté son environnement.

Émotions et physiologie sont donc intimement liées (tous les sous-systèmes du corps sont interdépendants). En conséquence, il pourrait être possible de faciliter l'apprentissage en agissant sur la régulation des émotions *via* la physiologie (il ne s'agit nullement d'une relation de cause à effet puisque les composantes ici en jeu sont tellement imbriquées qu'il est impossible de les distinguer, sauf à des fins heuristiques). À titre d'exemple, amener son rythme cardiaque à être « cohérent » revient à entraîner des changements physiologiques et psychologiques bénéfiques à la régulation émotionnelle[10].

9. Une étude diachronique illustre l'importance pour l'éducation de la gratification retardée. Dans cette étude, des enfants de quatre ans laissés seuls dans une salle avaient pour tâche de se retenir de manger une friandise placée devant eux, sachant que, s'ils y parvenaient, l'expérimentateur les autoriserait à en manger deux à son retour. Il apparaît que le laps de temps durant lequel un enfant donné s'est retenu avec succès était lié de façon significative à sa réussite scolaire ultérieure, celle-ci dépendant de la capacité de résister au stress et à la frustration, de persévérer dans une tâche et de se concentrer sur elle (OCDE, 2002a).
10. À Southampton, un programme pilote portant sur la littératie émotionnelle utilise ces principes pour enseigner aux gens à réguler leur rythme cardiaque grâce à des techniques respiratoires. Cela fait partie d'une série d'interventions visant à stabiliser l'état physiologique d'un individu pour lui permettre d'atteindre un état émotionnel cohérent (OCDE, 2003b). D'autres programmes concernent plus explicitement les problèmes de violence à l'école, qui sont de plus en plus nombreux. Ainsi, un protocole de communication non-violente a été mis au point par Marshall Rosenberg (1999), appliqué dans plusieurs pays, et a même entraîné la création d'écoles. La méthode Rosenberg cherche principalement à faire prendre conscience aux gens de leurs besoins fondamentaux et à les aider à les formuler en améliorant la communication, considérée comme la cause première des comportements violents. En Chine, où des millions d'adolescents souffrent à des degrés divers de troubles de l'apprentissage ou du comportement – sans doute liés à des problèmes de développement émotionnel –, le gouvernement a entrepris d'encourager le développement de la compétence émotionnelle afin d'assurer équilibre et qualité de vie, et de cultiver les interactions sociales positives (OCDE, 2002c).

Encadré 3.4. **Musique**

Jouer de la musique requiert de mobiliser des capacités motrices et de coordonner les perceptions auditives avec le contrôle musculaire. Lorsqu'on joue d'un instrument, le cerveau doit interpréter les perceptions somato-sensorielles. Beaucoup de musiciens ont développé une ambidextrie partielle. On peut donc s'attendre que cette meilleure coordination entre les régions motrices des deux hémisphères ait une base anatomique. Et en effet, le corps calleux (qui contient les bandes de fibres connectant entre elles les deux aires motrices) est plus large chez les musiciens que chez les autres (Weinberger, 2004).

Il semble aussi que la musique influence la capacité d'apprentissage du cerveau. Elle entraîne un agrandissement des zones corticales dévolues à l'audition et au mouvement. La recherche a montré que l'une des façons qu'a le cerveau de garder trace de l'importance d'un stimulus est de consacrer davantage de neurones à son traitement. Des études sur les cerveaux de musiciens montrent que ceux-ci disposent de spécialisations supplémentaires – surtout manifestes par l'hyper-développement de certaines structures –, mais on ne sait pas encore bien dans quelle mesure ces avantages peuvent être transférés à l'apprentissage d'autres compétences. L'apprentissage modèle le cerveau en augmentant l'intensité des réactions neurales et le nombre de neurones activés par les sons qui sont devenus importants pour l'individu concerné (Weinberger, 2004). En Allemagne, une étude par magnéto-encéphalographie (MEG) a révélé qu'entendre une note jouée au piano active une plus grande surface du cortex auditif chez les musiciens que chez les autres, et que plus le musicien a commencé la musique jeune, plus importante est la différence observée (Pantev et autres, 1998). Les zones du cortex moteur correspondant aux doigts de la main gauche réagissent beaucoup plus nettement chez les violonistes (Pantev, 2003). Les structures motrices et auditives sont plus grandes chez les musiciens : un entraînement prolongé peut donc modifier la structure profonde du système nerveux (Schlaug, 2003).

Étudier la musique peut aider à mieux comprendre le fonctionnement cérébral. La neuroscience est en train de montrer que le cerveau dispose de circuits distincts pour percevoir la musique, la traiter, et en jouer. Jouer, écouter et composer de la musique met en jeu presque toutes les fonctions cognitives. Les scientifiques ont déjà démontré en quoi les émotions positives influencent l'apprentissage. Ils pensent à présent que la musique pourrait bien jouer le même rôle. D'autres études sur la possibilité de transférer dans d'autres domaines les bénéfices liés à l'apprentissage de la musique seraient fort intéressantes pour l'avenir de l'éducation.

Comprendre les processus et les mécanismes neurofonctionnels pourrait permettre de développer des programmes éducatifs bien conçus afin de former l'intelligence émotionnelle et d'améliorer les capacités d'apprentissage du cerveau. Mieux connaître le développement cérébral et les émotions va faciliter la mise au point de stratégies de régulation émotionnelle adaptées aux différents âges. Les parents peuvent participer à l'élaboration d'un environnement émotionnel rassurant et stable en aidant leurs enfants à comprendre et exprimer ce qu'ils ressentent. Étudier les processus cérébraux par lesquels les enfants régulent – efficacement ou non – leurs émotions permettra d'identifier les troubles émotionnels, de prévoir leur apparition, voire de les prévenir.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Motivation

> Il y a énormément de plaisir à trouver dans la connaissance inutile.
>
> *Bertrand Russell*

La motivation, fondamentale dans le succès de tout apprentissage, est intimement liée à la compréhension et aux émotions. Résultante de composantes émotionnelles, elle correspond aux états dans lesquels l'organisme est préparé à agir de façon déterminée (physiquement et mentalement). Les émotions permettent d'évaluer l'attitude à adopter devant les choses : pour faire bref, les rechercher si elles sont agréables, les éviter si elles sont désagréables. Sur cette base, on peut formuler l'hypothèse que le système émotionnel produit la motivation.

Il est important de distinguer la motivation extrinsèque (liée à des facteurs externes) de la motivation intrinsèque (liée à des facteurs internes). La *motivation extrinsèque* s'obtient en affectant l'organisme de l'extérieur (par exemple par la punition ou la récompense, objectives ou symboliques), alors que la *motivation intrinsèque* correspond au souhait de l'organisme de satisfaire des besoins ou des désirs propres. Les systèmes éducatifs traditionnels favorisent la motivation extrinsèque, et jusqu'à aujourd'hui la recherche neuroscientifique s'est également concentrée sur cet aspect, car les mécanismes qui président aux pulsions internes sont encore mal compris, et en l'étant actuel de la technologie, ne sont pas facilement observables avec l'imagerie cérébrale. Et pourtant, une grande partie de l'apprentissage dépend de la motivation intrinsèque et non de facteurs extérieurs. Pour progresser dans la compréhension et l'amélioration des méthodes d'apprentissage il sera nécessaire que la neuroscience étudie les systèmes de motivation intrinsèque (McGraw, 1978).

La nature de la motivation interne à l'œuvre dans tout apprentissage efficace est fort intéressante, et la plupart des gens l'ont connue, enfants, pendant qu'ils jouaient. Beaucoup d'entre nous sommes toujours capables d'atteindre cet état que Czikszentmilhalyi appelle l'« absorption fluide (flow)[11] », par exemple lorsque nous pratiquons une activité vraiment agréable qui nous procure un plaisir fondamental indépendant de toute récompense extérieure. Parmi toutes les motivations possibles pour apprendre (y compris le désir d'approbation et de reconnaissance), l'une des plus puissantes, si ce n'est la plus puissante, est *comprendre*. Le cerveau réagit fort bien à l'« identification des schémas » (« pattern recognition ») ; c'est cet instant lumineux (« eurêka ! ») où le cerveau établit soudain des liens entre les éléments dont il dispose et où le sens émerge du chaos[12]. Le plaisir le plus intense que le cerveau puisse ressentir est sans doute lié à la résolution de problèmes intrinsèques ou internes. On a qualifié cet événement « d'orgasme intellectuel » (B. della Chiesa), et quand

11. Czikszentmilhalyi (1990) décrit ce « flow » comme l'état mental d'une personne intrinsèquement motivée par l'apprentissage. Le « flow » se caractérise par une concentration accrue, une implication totale et une satisfaction maximale.
12. Peter Gärdenfors, de l'Université de Lund (Suède), pendant la conférence coorganisée à Copenhague par le CERI et le Learning Lab Denmark en novembre 2004, a identifié l'expérience « eurêka! » comme correspondant à la *compréhension*, entendue comme « identification de schémas ». Une analogie avec un jeu pour enfants peut aider à comprendre ce dont il s'agit. Le jeu consiste en une sorte de « nuage de points », numérotés mais apparemment placés au hasard sur une feuille. L'enfant doit joindre les points, un par un, en suivant la progression des nombres, en commençant par le 1. Progressivement, l'enfant voit le chaos apparent de points se transformer en la représentation d'un objet reconnaissable. En d'autres termes, « comprendre, c'est transformer de l'information en connaissance » (B. della Chiesa).

on l'a connu une fois, on veut qu'il se répète. L'un des premiers (principaux) objectifs de l'éducation pré-scolaire devrait être de s'assurer que les enfants font aussi tôt que possible l'expérience de ce plaisir, et découvrent ainsi à quel point apprendre peut être agréable.

La neuroscience commence à comprendre certains des processus hédoniques de motivation qui encouragent l'apprentissage, mais des études supplémentaires sont nécessaires pour ancrer l'apprentissage dans un cadre scolaire. On estime souvent que l'école est ennuyeuse, et pour certains elle est même contraignante et démotivante. Il faut donc découvrir ce qui motive le cerveau. Si on essaie d'interpréter ce qui se passe quand le cerveau est enthousiaste, on observe des influences internes et externes. Il est nécessaire de réussir à donner un sens à l'apprentissage, et de savoir faire naître l'envie d'apprendre. Dans ce domaine, des recherches précises pourraient être directement utiles à l'éducation.

Encadré 3.5. **Jeu**

Le jeu peut beaucoup apporter en termes de motivation – qu'on raconte une histoire ou qu'on fasse quelque chose qui active l'imagination dans un contexte éducatif. Des chercheurs ont réussi à motiver des enfants face à des tests extrêmement laborieux et répétitifs en les présentant sous forme de jeux. Les accessoires traditionnels (par exemple des marionnettes) sont ceux qui motivent le plus les enfants. Les enseignants peuvent transformer des barrières bien connues – opposition systématique, mauvaise humeur, attitudes défensives – en un environnement positif en utilisant le jeu ou les marionnettes.

Une étude utilisant la topographie optique en proche infrarouge pour observer le cerveau de quelqu'un qui joue a montré que le volume sanguin dans le cortex lors d'un jeu avec des marionnettes est bien supérieur à celui observé lors de la même activité pratiquée de façon traditionnelle (Peyton et autres, 2005). Lors d'une étude menée par Nussbaum et autres (1999) sur trois cents écoliers, utilisant une série de jeux de type Gameboy, on a observé un haut niveau de motivation chez les enfants – à la fois ceux qui connaissaient bien ce jouet et ceux qui ne le possédaient pas. McFarlane et autres (2002), étudiant les opinions des enseignants sur le potentiel et les limites des jeux vidéo, ont rapporté une attitude positive face aux jeux d'aventure et de simulation. La plupart des enseignants reconnaissaient que les jeux contribuent au développement d'un large éventail de stratégies très importantes pour l'apprentissage (Gros, 2003).

Au Massachusetts Institute of Technology (MIT), le Media Laboratory a créé Sam, un personnage servant à travailler le développement langagier des enfants. Sam permet aux enfants de raconter des histoires à l'aide d'objets réels, aux côtés d'un camarade virtuel qui a lui aussi accès à ces objets réels. Ce programme améliore la façon dont les enfants écoutent les histoires grâce à une interface qui leur permet d'inventer des histoires plus imaginatives et plus complexes que lorsqu'ils jouent seuls (Cassel et autres, 2000).

Ainsi, le jeu semble susciter la motivation des apprenants mais aussi exacerber l'imagination et encourager le passage à l'action. En effet, jouer implique une démarche active et contribue au développement de compétences, de capacités et de stratégies.

Pourtant, aux États-Unis, beaucoup d'écoles ont raccourci ou supprimé les récréations, et l'importance accordée à l'évaluation du niveau des élèves leur laisse peu de temps pour jouer. Les parents ont eux aussi leur part de responsabilité, s'ils inscrivent par exemple leurs enfants à trop d'activités éducatives extrascolaires, ce qui limite le temps qu'ils peuvent passer à jouer. Dans un monde où les écoles sont de plus en plus obsédées par leur mission strictement académique, le jeu fait figure d'exception.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Encadré 3.6. **Jeux vidéo**

On en sait étonnamment peu sur les effets des jeux vidéo sur la santé, la cognition, la santé sociale et le comportement des enfants. La recherche n'a visiblement pas avancé au même rythme que la technologie.

À Ulm, au Centre de transfert pour la neuroscience et l'apprentissage (voir encadré 7.7 au chapitre 7), les chercheurs ont entrepris d'étudier l'influence des media sur le bien-être psychologique et physique des enfants. De même, des études menées à l'université de Rochester en 2003 ont montré que les jeunes adultes qui passaient beaucoup de temps à jouer à des jeux vidéo rapides avaient de meilleures capacités visuelles que les autres, et que leur capacité d'attention dans des environnements visuels complexes était supérieure. Il est également possible qu'ils « soient mieux capables de suivre plusieurs éléments en même temps, et de mieux traiter une information visuelle rapide et changeante » (Green et Bavelier, 2003). Les plus récents des jeux vidéo, qui font appel à l'imagerie spatiale et dynamique, poussent le joueur à porter son attention sur plusieurs points de l'écran, ce qui pourrait améliorer l'attention et les capacités visuelles.

Il ne faut pourtant pas oublier que la violence est un élément très courant dans la plupart des jeux vidéo. Des études ont montré qu'un excès d'images émotionnellement chargées peut renforcer les comportements antisociaux (Anderson, 2004). Les réactions émotionnelles provoquées par les jeux – danger, violence, défi – jouent un rôle dans l'attirance suscitée. Les jeux sont-ils inoffensifs, ou bien apprennent-ils aux enfants à être agressifs – voire à tuer ? Ceux qui sont contre les jeux vidéo mettent en avant des études récentes qui relèvent un lien étroit entre jeux violents et comportements agressifs. Des chercheurs disent que jouer provoque alors les mêmes activités cérébrales qu'une agression réelle. Ainsi, une étude de l'université d'Aix-la-Chapelle demandait à des hommes de jouer à un jeu dans lequel ils devaient tuer des terroristes pour sauver des otages (Weber et autres, 2006). Pendant la partie, lors d'une bataille, les zones du cerveau liées aux émotions (dont l'amygdale et le cortex cingulaire antérieur) étaient désactivées. On a observé la même chose sur des scanners cérébraux de gens qui imaginaient une agression. À l'université de Tübingen (Allemagne), Birbaumer a proposé l'idée que jouer régulièrement à des jeux vidéo violents pourrait renforcer des circuits cérébraux, et qu'un joueur confronté à une situation réelle similaire serait plus susceptible d'être agressif (Motluk, 2005).

Les chercheurs ne savent pas encore si les jeux vidéo sont bénéfiques ou néfastes pour les enfants, mais il est certain que ces jeux leurs permettent d'améliorer leur maîtrise de l'outil informatique, ce qui est aujourd'hui vital. De nouvelles études sont nécessaires pour évaluer l'impact des media sur le développement cognitif et émotionnel des enfants. La technologie moderne devrait être utilisée pour simuler des expériences réelles, pour travailler individuellement (donc sans risquer de se tromper devant les autres élèves), et comme élément de jeu et de motivation. La recherche dans ce domaine permettrait de légitimer le jeu dans l'esprit des décideurs politiques et des praticiens de l'éducation – au-delà de son importance, déjà reconnue, pour l'éducation des jeunes enfants – et contribuerait à faire du jeu une « ressource d'apprentissage naturelle », capable de remédier à bien des difficultés.

Sommeil et apprentissage

La fonction du sommeil a toujours beaucoup intéressé les scientifiques. Le sommeil reste un mystère. Nous ne savons toujours pas pourquoi nous dormons. D'un point de vue neurologique, le sommeil est un état particulier du cerveau[13]. Il n'est pas besoin d'études

13. Ce n'est qu'en 1953 que Nathaniel Kleitman a montré que, contrairement aux idées reçues, le sommeil n'est pas l'interruption de toute activité cérébrale (Siegel, 2003).

neurologiques pour savoir que les humains ont besoin de dormir pour conserver une vigilance satisfaisante. Le sommeil est clairement indispensable à la vie[14]. Les chercheurs sont d'accord pour dire que, si beaucoup de fonctions corporelles peuvent se régénérer durant les moments de veille, seul le sommeil peut restaurer les fonctions corticales (Horne, 2000). La qualité du sommeil est étroitement liée au bien-être général, et mal dormir peut avoir des conséquences négatives sur l'humeur (Poelstra, 1984) et le comportement (Dahl et Puig-Antich, 1990). Des troubles latents du sommeil peuvent se manifester sous forme de symptômes psychiatriques (Reite, 1998). Chez l'adulte, la somnolence diurne est liée à des handicaps professionnels et sociaux, à une augmentation de la fréquence des troubles psychiatriques, et à un risque accru d'accidents de voiture (Ohayon et autres, 1997).

Des études menées à bien des niveaux – du comportemental au moléculaire – suggèrent que pour l'homme comme pour d'autres mammifères, le sommeil contribue à l'apprentissage (Maquet, 2001). C'est au cours d'études animales qu'on a d'abord fait le lien entre sommeil et apprentissage/plasticité : elles indiquent une corrélation entre quantité de sommeil paradoxal et performances lors des tâches apprises (Smith, 1996)[15]. De récentes études sur des sujets humains ont apporté la preuve de l'implication du sommeil à ondes lentes (et, observées à l'EEG, des oscillations lentes qui y sont associées) dans la consolidation de la mémoire et la plasticité neuronale qui la sous-tend (Huber et autres, 2004 ; Marshall et autres, 2006). Des approches par imagerie fonctionnelle (enregistrant l'activité de vastes réseaux de neurones) ainsi que des expériences génétiques ou pharmacologiques sur le cerveau ont débouché sur des résultats concordants : les différents types de sommeil (sommeil à ondes lentes et sommeil paradoxal) œuvrent de concert pour traiter les souvenirs récents et consolider la mémoire – chez diverses espèces animales et pour divers types d'apprentissage (Stickgold, 2003). Alors que le sommeil paradoxal semble être particulièrement bénéfique à la consolidation mémorielle liée aux habiletés, le sommeil à ondes lentes accroît en particulier la consolidation de la mémoire déclarative explicite, qui dépend de l'hippocampe. Nombre d'autres études sur la privation de sommeil indiquent que le sommeil contribue à la stabilisation des souvenirs. Des études menées tant sur des animaux que sur des sujets humains concluent que des expériences récentes sont traitées « en arrière-plan » (« off-line ») durant les phases de sommeil, renforçant ainsi la consolidation de la mémoire (Ji et Wilson, 2007 ; Rasch et autres, 2007) ; par un processus inverse, des analyses du système thalamo-cortical ont récemment montré que le sommeil lui-même est un processus plastique affecté par les expériences vécues à l'état de veille (Miyamoto et Hensch, 2003). Une hypothèse postule que le sommeil joue un rôle fondamental dans la plasticité cérébrale, c'est-à-dire dans l'entretien d'un système de connexions neurales appropriées *via* un processus de renforcement des synapses utiles et d'élimination des synapses superflues. Il a ainsi été suggéré que, pendant le sommeil, l'ensemble du cortex pourrait subir des modifications plastiques lors de « mises à jour » des expériences du monde, notamment en fonction des événements de la veille (Kavanau, 1997).

14. On a tendance à dormir plus longtemps après un sommeil « manqué », et une privation chronique de sommeil (de deux à trois semaines) finit par tuer les rats (Miyamoto et Hensch, 2003).
15. C'est lors du sommeil paradoxal que l'on rêve. À ce moment-là, l'activité cérébrale est très similaire à celle que l'on observe en état de veille. À ce jour, la fonction du sommeil paradoxal fait encore l'objet de débats. Certains scientifiques ont émis l'idée que sommeil paradoxal et apprentissage procédural étaient liés, mais la corrélation entre temps de sommeil paradoxal et capacité d'apprentissage n'est pas établie (Nelson, 2004).

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Chez l'enfant, les troubles du sommeil peuvent être liés à de nombreux problèmes physiques, à des maladies neurologiques et à des pathologies psychologiques (Ferber et Kryger, 1995) – principalement des problèmes émotionnels et comportementaux (hyperactivité, difficultés d'apprentissage) – et sont souvent importants et persistants. Ils sont courants durant toute l'enfance. Des études épidémiologiques ont montré qu'environ un tiers des enfants souffre de problèmes de sommeil (Simonds et Panaga, 1984 ; Kahn et autres, 1989 ; Blader et autres, 1997 ; Rona et autres, 1998), et, selon les pédiatres cliniciens, ces troubles arrivent en cinquième position dans les inquiétudes exprimées par les parents, après les maladies, la nourriture, les problèmes comportementaux et les anomalies physiques (Mindell et autres, 1994).

Certains troubles du sommeil sont répandus à tout âge (Wiggs et Stores, 2001), mais d'autres concernent plus particulièrement les adolescents. Une étude par questionnaire des habitudes de sommeil portant sur 25 000 personnes entre 10 et 90 ans a montré que généralement, les enfants se lèvent tôt, mais qu'avec l'arrivée de l'adolescence ils dorment de plus en plus tard (voir partie II, article B). La courbe redescend aux alentours de 20 ans (Abbott, 2005). C'est à la puberté que les somnolences diurnes sont les plus importantes, et ce même si la durée globale de sommeil reste identique : le besoin biologique de dormir ne diminue donc pas à l'adolescence (Carskadon et autres, 1980).

Certaines études sur les enfants suggèrent indirectement que le manque de sommeil et les troubles du sommeil sont liés à une moins bonne réussite scolaire : moins l'enfant dort, plus mauvais sont ses résultats (Wolfson et Carskadon, 1998). Comme nous l'avons dit, beaucoup d'enfants souffrent de manque de sommeil chronique. Il est donc vraiment important de savoir que le manque de sommeil peut nuire à un cerveau en plein développement. Pour des raisons éthiques, très peu d'études expérimentales sur la privation de sommeil chez les enfants ont été réalisées. Deux études se sont intéressées aux séquelles cognitives. La première a montré qu'une nuit blanche avait le même effet chez les enfants (de 11 à 14 ans) que chez les adultes (Carskadon et autres, 1981). Ultérieurement, on a observé que des restrictions partielles handicapaient certaines fonctions cognitives même si les tâches routinières, en revanche, restaient stables même après une nuit entièrement blanche (Randazzo et autres, 1998). On a vu récemment qu'un sommeil trop bref entraînait une baisse des performances lors de tâches de mémorisation à court terme (Steenari et autres, 2003).

Ces dernières années, un nombre croissant d'études ont rapporté l'existence de liens entre les troubles du sommeil chez l'enfant et divers symptômes psychiatriques, dont la dépression et les troubles comportementaux (Morrison et autres, 1992; Chervin et autres, 1997; Dagan et autres, 1997; Corkum et autres, 1998; Dahl, 1998; Marcotte et autres, 1998; Aronen et autres, 2000; Smedje et autres, 2001). L'ADHD (« Attention Deficit Hyperactivity Disorder » : trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité) est un trouble neuro-psychiatrique, souvent associé à des troubles du sommeil. Plusieurs études par questionnaire ont montré que les enfants souffrant d'ADHD ont un sommeil plus perturbé que les autres (Chervin et autres, 1997; Marcotte et autres, 1998; Stein, 1999; Owens et autres, 2000a). Leurs parents rapportent plus fréquemment différents problèmes : refus d'aller se coucher, difficultés d'endormissement, angoisses, somnolences diurnes, parasomnie et durée de sommeil réduite (Owens et autres, 2000b). Les troubles du sommeil sont parfois liés à des facteurs environnementaux. Ainsi, beaucoup regarder la télévision – surtout le soir – nuit au sommeil (Owens et autres, 2000a). Le refus d'aller se coucher (Blader et autres, 1997; Smedje et autres, 1998) et le fait de dormir dans le même lit que les parents

Encadré 3.7. **Niveaux sonores**

En classe, le canal auditif est capital : de nombreuses informations passent par cette modalité sensorielle. Des niveaux sonores élevés semblent affecter les résultats scolaires des enfants en perturbant l'apprentissage. Une étude de la London Southbank University a mesuré les niveaux sonores à l'extérieur de 142 écoles primaires londoniennes, et les a mis en parallèle avec les résultats d'examens nationaux standardisés que passent les élèves à 7 et 11 ans. Plus l'environnement était bruyant, moins bons étaient les résultats, même quand les autres explications possibles (milieu social défavorisé, etc.) étaient prises en compte (Shield et Dockrell, 2004).

Selon les Lignes directrices pour la lutte contre le bruit ambiant de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), le bruit à l'école perturbe la communication, l'extraction d'informations (par exemple la compréhension ou l'acquisition de la lecture), et dérange. Les lignes directrices pour le bruit dans les salles de classe disent que, afin que les paroles soient correctement entendues et comprises, la pression acoustique ne devrait pas dépasser un niveau équivalent à 35 dB durant les leçons. Pour les enfants souffrant de déficiences auditives, le niveau sonore devrait être encore plus bas. Dans les cours de récréation, la pression acoustique due à des sources externes ne devrait pas dépasser 55 dB, comme dans les zones résidentielles pendant la journée.

(Lozoff et autres, 1984; Madansky et autres, 1990; Latz et autres 1999) sont également des facteurs qui peuvent nuire à l'endormissement.

Il importe de savoir quelle quantité de sommeil est nécessaire. Les différences individuelles dans ce domaine étant importantes, il est impossible d'indiquer des règles simples valables pour tous les enfants[16]. Quand l'école commence tôt, les enfants souffrent plus souvent de manque de sommeil et de somnolences diurnes, et risquent d'avoir de moins bons résultats (Carskadon et autres, 1998). Ils se plaignent nettement plus d'être fatigués au cours de la journée, et rapportent davantage de difficultés d'attention et de concentration (Epstein et autres, 1998). Il n'est pourtant pas encore prouvé que l'école commence trop tôt. De nouvelles études sont nécessaires pour établir les effets des horaires de classe. Il faut également réaliser des expériences pour éclairer les relations entre sommeil et consolidation de la mémoire. On sait également que faire la sieste après avoir appris quelque chose semble améliorer les performances. L'idée populaire qui veut que le sommeil aide à intégrer un apprentissage n'est donc pas vraiment un neuromythe (voir le chapitre 6). Robert Stickgold (2003), lors d'études portant sur un groupe d'étudiants de l'université de Harvard, a montré que les performances liées à des tâches complexes nécessitant beaucoup de concentration pouvaient être restaurées par une sieste d'une durée de 30 à 60 minutes.

Le manque de sommeil étant semble-t-il fréquent chez les enfants, il est nécessaire de poursuivre les études sur les troubles du sommeil, et de réaliser des expériences afin de mieux connaître leurs liens avec les symptômes psychiatriques et la baisse des performances cognitives. Des études diachroniques permettraient d'éclairer l'évolution des besoins en sommeil aux différents âges de la vie, et de savoir quelle quantité de

16. Sur le long terme, « aider » les gens à dormir plus longtemps grâce à des somnifères pourrait raccourcir l'espérance de vie, et il semble que ce n'ait de toute façon pas d'influence positive sur la santé (Siegel, 2003; voir aussi chapitre 7).

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

sommeil permet de faire en sorte que le cerveau soit en bonne santé (capable d'apprendre), et que le bien-être émotionnel ne soit pas menacé. Étudier les mécanismes et l'évolution du sommeil permettra de savoir ce qui est réparé par le sommeil, quels processus d'apprentissage en bénéficient le plus, et quelle durée de sommeil est nécessaire. Les cours, les formations professionnelles et les conférences seraient plus efficaces si elles étaient programmées en fonction de ce que la science sait du sommeil. Les cours des adolescents pourraient être fixés plus tard dans la journée, et les éducateurs pourraient leur conseiller de réviser leurs leçons après une nuit de sommeil. Les parents, quant à eux, favoriseraient le développement du cerveau de leurs enfants en s'assurant que ceux-ci dorment suffisamment, et en évitant qu'ils pratiquent avant de se coucher des activités trop excitantes (par exemple les jeux vidéo).

Conclusions

La neuroscience montre que la façon dont on nourrit et traite le cerveau joue un rôle crucial dans le processus d'apprentissage, et commence à déterminer quels sont les environnements les plus favorables à l'apprentissage. La plupart des façons d'améliorer le fonctionnement cérébral dépendent de facteurs simples et quotidiens – qualité de l'environnement social et des rapports humains, alimentation, exercice physique et sommeil – qui semblent tellement évidents qu'on a tendance à négliger leur importance. 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.

On sait aujourd'hui que nos émotions modifient le tissu neural. En cas de stress excessif ou de peur intense, les processus neuraux de régulation émotionnelle sont perturbés, ce qui diminue les capacités de jugement social et les performances cognitives. Un peu de stress rend performant, mais au-delà d'un certain stade, on obtient l'effet inverse. Quant aux émotions positives, il est clair que l'un des plus grands facteurs de motivation est ce sentiment d'illumination qui se produit lorsqu'on comprend un nouveau concept; le cerveau réagit très bien à cette sensation. L'école devrait faire en sorte que les enfants découvrent très jeunes le plaisir de comprendre, se rendant ainsi compte qu'apprendre est une expérience très agréable. Pour apprendre efficacement, il est très important de savoir gérer ses émotions; l'autorégulation est l'une des compétences les plus importantes parmi celles qui sont nécessaires à l'enfant comme à l'adulte dans leurs environnements sociaux.

Références

Abbott, A. (2005), « Physiology: An End to Adolescence », *Nature*, vol. 433, n° 7021, pp. 27.

Anderson, C. (2004), « Violence in the Media: Its Effects on Children », transcription du séminaire présenté à Melbourne, Australie, Young Media Australia, Glenelg, Australie du Sud et le Victorian Parenting Centre, Melbourne, Victoria, 11 septembre.

Aronen, E.T., E.J. Paavonen, M. Fjällberg, M. Soininen et J. Törrönen (2000), « Sleep and Psychiatric Symptoms in School-age Children », *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, vol. 39, pp. 502-508.

Blader, J.C., H.S. Koplewicz, H. Abikoff et C. Foley (1997), « Sleep Problems of Elementary School Children: A Community Survey », *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, vol. 151, pp. 473-480.

Blakemore, S.-J., J. Winston et U. Frith (2004), « Social Neuroscience: Where Are We Heading? », *TRENDS in Cognitive Sciences*, vol. 8, n° 5, pp. 216-222.

Calkins, S.D. (2004), « Temperament and Emotional Regulation: Multiple Models of Early Development », dans Mario Beauregard (éd.), *Consciousness, Emotional Self-Regulation and the Brain. Advances in Consciousness Research* 54, John Benjamins Publishing Company, Amsterdam, pp. 35-39.

Carlton, M.P. et A. Winsler (1999), « School Readiness: The Need for a Paradigm Shift », *School Psychology Review*, vol. 28, n° 3, pp. 338-352.

Carskadon, M.A. et C. Acebo (2002), « Regulation of Sleepiness in Adolescence: Update, Insights, and Speculation », *Sleep*, vol. 25, pp. 606-614.

Carskadon, M.A., K. Harvey et W.C. Dement (1981), « Sleep Loss in Young Adolescents », *Sleep*, vol. 4, pp. 299-312.

Carskadon, M.A., K. Harvey, P. Duke, T.F. Anders, I.F. Litt et W.C. Dement (1980), « Pubertal Changes in Daytime Sleepiness », *Sleep*, vol. 2, pp. 453-460.

Carskadon, M.A., A.R. Wolfson, C. Acebo, O. Tzischinsky et R. Seifer (1998), « Adolescent Sleep Patterns, Circadian Timing, and Sleepiness at a Transition to Early School Days », *Sleep*, vol. 21, pp. 871-881.

Cassell, J., M. Ananny, A. Basu, T. Bickmore, P. Chong, D. Mellis, K. Ryokai, J. Smith, H. Vilhjálmsson et H. Yan (2000), « Shared Reality: Physical Collaboration with a Virtual Peer? », dans *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, Amsterdam, 4-9 avril, pp. 259-260.

Chervin, R.D., J.E. Dillon, C. Bassetti, D.A. Ganoczy et K.J. Pituch (1997), « Symptoms of Sleep Disorders, Inattention, and Hyperactivity in Children », *Sleep*, vol. 20, pp. 1185-1192.

Colcombe, S.J., K.I. Erickson, N. Raz, A.G. Webb, N.J. Cohen, E. McAuley et A.F. Kramer (2003), « Aerobic Fitness Reduces Brain Tissue Loss in Aging Humans », *Journal of Gerontology*, vol. 58A, n° 2, pp. 176-180.

Colcombe, S.J. et A.F. Kramer (2004), « Fitness Effects on the Cognitive Function of Older Adults: A Meta-analytic Study », *Psychological Science*, vol. 14, n° 2, pp. 125-130.

Colcombe, S.J., A.F. Kramer, K.I. Erickson, P. Scalf, E. McAuley, N.J. Cohen, A.G. Webb, G.J. Jerome, D.X. Marquez et S. Elavsky (2004), « Cardiovascular Fitness, Cortical Plasticity, and Aging », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 101, n° 9, pp. 3316-3321.

Cole, P.M., S.E Martin et T.A. Dennis (2004), « Emotion Regulation as a Scientific Construct: Methodological Challenges and Directions for Child Development Research », *Child Development*, vol. 75, n° 2, pp. 317-333.

Corkum, P., R. Tannock et H. Moldofsky (1998), « Sleep Disturbances in Children with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder », *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, vol. 37, pp. 637-646.

Csikszentmihalyi, M. (1990), *Flow: The Psychology of Optimal Experience*, Harper and Row, New York.

Dagan, Y., S. Zeevi-Luria, Y. Sever, D. Hallis, I. Yovel, A. Sadeh et E. Dolev (1997), « Sleep Quality in Children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder: An Actigraphic Study », *Psychiatry & Clinical Neurosciences*, vol. 51, pp.383-386.

Dahl, R.E. (1998), « The Development and Disorders of Sleep », *Advances in Pediatrics*, vol. 45, pp. 73-90.

Dahl, R.E. et J. Puig-Antich (1990), « Sleep Disturbances in Child and Adolescent Psychiatric Disorders », *Pediatrician*, vol. 17, pp. 32-37.

Damasio, A.R. (1994), *Descartes' Error: Emotion, Reason, and the Human Brain*, G.P. Putnam, New York.

Denham, S.A. et R. Burton (2003), *Social and Emotional Prevention and Intervention Programming for Preschoolers*, Kluwer-Plenum, New York.

Eippert, F., R. Veit, N. Weiskopf, M. Erb, N. Birbaumer et S. Anders (2006), « Regulation of Emotional Responses Elicited by Threat-related Stimuli », *Hum Brain Mapp*, 28 novembre.

Eisenberg, N. et R.A. Fabes (éd.) (1992), *Emotion and Its Regulation in Early Development: New Directions for Child and Adolescent Development*, Jossey-Bass/Pfeiffer, San Francisco, CA.

Epstein, R., N. Chillag et P. Lavie (1998), « Starting Times of School: Effects on Daytime Functioning of Fifth-grade Children in Israel », *Sleep*, vol. 21, pp. 250-256.

Fadiga, L., L. Fogassi, G. Pavesi et G. Rizzolatti (1995), « Motor Facilitation during Action Observation: A Magnetic Stimulation Study », *Journal of Neurophysiology*, vol. 73, n° 6, pp. 2608-2611.

Ferber, R. et M. Kryger (éd.) (1995), *Principles and Practice of Sleep Medicine in the Child*, W.B. Saunders Company, Philadelphie.

Fries, A.B., T.E. Ziegler, J.R. Kurian, S. Jacoris et S.D. Pollak (2005), « Early Experience in Humans is Associated with Changes in Neuropeptides Critical for Regulating Social Behaviour », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102, n° 47, pp. 17237-17240.

Gesch, C.B., S.M. Hammond, S.E. Hampson, A. Eves et M.J. Crowder (2002), « Influence of Supplementary Vitamins, Minerals and Essential Fatty Acids on the Antisocial Behaviour of Young Adult Prisoners: Randomised, Placebo-Controlled Trial », *British Journal of Psychiatry*, vol. 181, n° 1, pp. 22-28.

Green, C. et D. Bavelier (2003), « Action Video Game Modifies Visual Selective Attention », *Nature*, vol. 423, pp. 534-537.

Gros, B. (2003), « The Impact of Digital Games in Education », *First Monday – Peer-reviewed Journal*.

Gross, J. J. et O.P. John (2003), « Individual Differences in Two Emotion Regulation Processes: Implications for Affect, Relationships, and Well-being », *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 85, pp. 348-362.

Horne, J.A. (2000), « REM Sleep – By Default? », *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 24, n° 8, pp. 777-797.

Huber, R., M.F. Ghilardi, M. Massimini et G. Tononi (2004), « Local Sleep and Learning », *Nature*, vol. 430, n° 6995, pp. 78-81.

Ji, D. et M.A. Wilson (2007), « Coordinated Memory Replay in the Visual Cortex and Hippocampus during Sleep », *Nature Neuroscience*, vol. 10, n° 1, pp. 100-107.

Johnson, S. (2004), « Thinking Faster: Are the Brain's Emotional Circuits Hardwired for Speed? », *Discover*, vol. 25, n° 5, mai.

Kahn, A., C. Van de Merckt, E. Rebuffat, M.J. Mozin, M. Sottiaux, D. Blum et P. Hennart (1989), « Sleep Problems in Healthy Preadolescents », *Pediatrics*, vol. 84, pp.542-546.

Kavanau, J.L. (1997), « Memory, Sleep and the Évolution of Mechanisms of Synaptic Efficacy Maintenance », *Neuroscience*, vol. 79, n° 1, pp. 7-44.

Latz, S., A.W. Wolf et B. Lozoff (1999), « Cosleeping in Context: Sleep Practices and Problems in Young Children in Japan and the United States », *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, vol. 153, pp. 339-346.

LeDoux, J.E. (2000), « Emotion Circuits in the Brain », *Annual Review of Neuroscience*, vol. 23, pp. 155-184.

Lewis, M.D. et J. Stieben (2004), « Emotion Regulation in the Brain: Conceptual Issues and Directions for Developmental Research », *Child Development*, vol. 75, n° 2, mars, pp. 371-376.

Lozoff, B., A.W. Wolf et N.S. Davis (1984), « Cosleeping in Urban Families with Young Children in the United States », *Pediatrics*, vol. 74, pp. 171-182.

Madansky, D. et C. Edelbrock (1990), « Cosleeping in a Community Sample of 2- and 3-year-old Children », *Pediatrics*, vol. 86, pp. 197-203.

Maquet, P. (2001), « The Role of Sleep in Learning and Memory », *Science*, vol. 294, n° 5544, pp. 1048-1052.

Marcotte, A.C., P.V. Thacher, M. Butters, J. Bortz, C. Acebo et M.A. Carskadon (1998), « Parental Report of Sleep Problems in Children with Attentional and Learning Disorders », *Journal of Developmental & Behavioral Pediatrics*, vol. 19, pp. 178-186.

Marshall, L., H. Helgadottir, M. Molle et J. Born (2006), « Boosting Slow Oscillations during Sleep Potentiates Memory » vol. 444, n° 7119, pp. 610-613.

McEwen, B.S. et R.M. Sapolsky (1995), « Stress and Cognitive Function », *Curr Opin Neurobiol*, vol. 5, pp. 205-216.

McFarlane, A., A. Sparrowhawk et Y. Heald (2002), *Report on the Educational Use of Games*, TEEM, Cambridge, *www.teem.org.uk/publications/teem_gamesined_full.pdf*

McGraw, K.O. (1978), « The Detrimental Effects of Reward on Performance: A Literature Review and a Prediction Model », dans M.R. Lepper et D. Greene (éd.), *The Hidden Costs of Reward: New Perspectives on the Psychology of Human Motivation,* Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, pp. 33-60.

Meyers A.F., A.E. Sampson, M. Weitzman, M.L. Rogers et H. Kayne (1989), « School Breakfast Program and School Performance », *American Journal of Diseases of Children*, vol. 143, n° 10, pp. 1234-1239.

Mindell J.A., M.L. Moline, S.M. Zendell, L.W. Brown et J.M. Fry (1994), « Pediatricians and Sleep Disorders: Training and Practice », *Pediatrics*, vol. 94, pp. 194-200.

Minnesota Department of Children, Families and Learning (1998), *School Breakfast Programs Energizing the Classroom*, Minnesota Department of Children, Families and Learning, Roseville, MN.

Miyamoto, H. et T.K. Hensch (2003), « Reciprocal Interaction of Sleep and Synaptic Plasticity », *Molecular Interventions*, vol. 3, n° 7, pp. 404-407.

Molteni, R., A. Wu, S. Vaynman, Z. Ying, R.J. Barnard et F. Gomez-Pinilla (2004), « Exercise Reverses the Harmful Effects of Consumption of a High-fat Diet on Synaptic and Behavioral Plasticity Associated to the Action of Brain-derived Neurotrophic Factor », *Neuroscience*, vol. 123, n° 2, pp. 429-440.

Morrison, D.N., R. McGee et W.R. Stanton (1992), « Sleep Problems in Adolescence », *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, vol. 31, pp. 94-99.

Moser, T. (2001), « Sprechen ist Silber, Bewegen ist Gold? Zum Zusammenhang zwischen Sprache und Bewegung aus psychomotorischer und handlungstheoretischer Sicht », dans J.R.Nitsch et H. Allmer (éd.), *Denken – Sprechen – Bewegen. Bericht über die 32. Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Sportpsychologie vom 1.3. Juni 2000 in Köln*, Köln, pp. 168-174.

Moser, T. (2004), « The Significance of Physical Activity for the Psychosocial Domain: A Crash between Myths and Empirical Reality? », dans P. Jørgensen et N. Vogensen (éd.), *What's Going on in the Gym? Learning, Teaching and Research in Physical Éducation*, Université du Danemark du Sud, Odense, pp. 50-71.

Motluk, A. (2005), « Do Games Prime Brain *[Sic]* for Violence? », *New Scientist*, vol. 186, n° 2505, 25 juin, p. 10.

Mourão-Miranda, J., E. Volchan, J. Moll, R. de Oliveira-Souza, L. Oliveira, I. Bramati, R. Gattass et L. Pessoa (2003), « Contributions of Stimulus Valence and Arousal to Visual Activation during Emotional Perception », *Neuroimage*, vol. 20, n° 4, pp. 1955-1963.

Nelson, L. (2004), « While You Were Sleeping », *Nature*, vol. 430, n° 7003, pp. 962-964.

Nicolson, R.I., A.J. Fawcett et P. Dean (1995), « Time Estimation Deficits in Developmental Dyslexia: Evidence of Cerebellar Involvement », *Proceedings. Biological sciences*, vol. 259, n° 1354, pp. 43-47.

Nussbaum, M.C. (2001), *Upheavals of Thought: the Intelligence of Emotions*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 751.

Nussbaum, M., R. Rosas, P. Rodríguez, Y. Sun et V. Valdivia (1999), « Diseño, desarrollo y evaluaciòn de video juegos portàtiles educativos y autorregulados », *Ciencia al Dìa Internacional*, vol. 2, n° 3, pp. 1-20.

Ochsner, K.N., R.D. Ray, J.C. Cooper, E.R. Robertson, S. Chopra, J.D. Gabrieli et J.J. Gross (2004), « For Better or for Worse: Neural Systems Supporting the Cognitive down- and up-regulation of Negative Emotion », *Neuroimage*, vol. 23(2), pp. 483-499.

O'Connor, T.G., D. Bredenkamp et M. Rutter (1999), « Attachment Disturbances and Disorders in Children Exposed to Early Severe Deprivation », *Infant Mental Health Journal*, vol. 20, n° 10, pp. 10-29.

OCDE (2002a), Premier forum sur « Brain Mechanisms and Early Learning », New York, *www.oecd.org/dataoecd/40/18/15300896.pdf*.

OCDE (2002b), *Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage*, OCDE, Paris.

OCDE (2002c), « Learning Sciences and Brain Research: Report of the Launching Meeting of Phase II », Royal Institution, Londres, 29-30 avril, pp. 7-8, *www.oecd.org/dataoecd/40/36/15304667.pdf*.

OCDE (2003a), « A Report of the Brain Research and Learning Sciences Mini-symposium on the Design of Rehabilitation Software for Dyscalculia », Unité de l'INSERM sur la neuroimagerie cognitive, Orsay, France, 20 septembre, *www.oecd.org/dataoecd/50/39/18268884.pdf*.

OCDE (2003b), « A Report of the Brain Research and Learning Sciences Emotions and Learning Planning Symposium », Hôpital psychiatrique, Université d'Ulm, Allemagne, 3 décembre, *www.oecd.org/dataoecd/57/49/23452767.pdf*.

Ohayon, M.M., M. Caulet, P. Philip, C. Guilleminault et R.G. Priest (1997), « How Sleep and Mental Disorders are Related to Complaints of Daytime Sleepiness », *Archives of Internal Medicine*, vol. 157, pp. 2645-2652.

Owens, J.A., R. Maxim, C. Nobile, M. McGuinn et M. Msall (2000a), « Parental and Self-report of Sleep in Children with Attention Deficit/Hyperactivity Disorder », *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, vol. 154, pp. 549-555.

Owens, J.A., A. Spirito et M. McGuinn (2000b), « The Children's Sleep Habits Questionnaire (CSHQ): Psychometric Properties of a Survey Instrument for School-aged Children », *Sleep*, vol. 23, pp. 1043-1051.

Pantev, C. (2003), « Representational Cortex in Musicians », dans I. Peretz et R.J. Zatorre (éd.), *The Cognitive Neuroscience of Music*, Oxford University Press, New York, pp.382-395.

Pantev, C., R. Oostenveld, A. Engelien, B. Ross, L.E. Roberts et M. Hoke (1998), « Increased Auditory Cortical Representation in Musicians », *Nature*, vol. 392, n° 6678, pp. 811-813.

Peyton, J.L., W.T. Bass, B.L. Burke et L.M. Frank (2005), « Novel Motor and Somatosensory Activity is Associated with Increased Cerebral Cortical Blood Volume Measured by Near-infrared Optical Topography », *Journal of Child Neurology*, vol. 10, pp. 817-821.

Poelstra, P.A. (1984), « Relationship between Physical, Psychological, Social, and Environmental Variables and Subjective Sleep Quality », *Sleep*, vol. 7, pp. 255-260.

Randazzo, A.C., M.J. Muehlbach, P.K. Schweitzer et J.K. Walsh (1998), « Cognitive Function Following Acute Sleep Restriction in Children Ages 10-14 », *Sleep*, vol. 21, pp. 861-868.

Rasch, B., C. Büchel, S. Gais et J. Born (2007), « Odor Cues During Slow-Wave Sleep Prompt Declarative Memory Consolidation », *Science*.

Reite, M. (1998), « Sleep Disorders Presenting as Psychiatric Disorders », *Psychiatric Clinics of North America*, vol. 21, pp. 591-607.

Richardson, A.J. et P. Montgomery (2005), « The Oxford-Durham Study: A Randomized Controlled Trial of Dietary Supplementation with Fatty Acids in Children with Developmental Coordination Disorder », *Pediatrics*, vol. 115, n° 5, pp. 1360-1366.

Rimmele, U., B. Costa Zellweger, B. Marti, R. Seiler, C. Mohiyedinni, U. Ehlert et M. Heinrichs (2007a), « Elite Sportsmen Show Lower Cortisol, Heart Rate and Psychological Responses to a Psychosocial Stressor Compared with Untrained Men », *Psychoneuroendocrinology*.

Rimmele, U. et autres (2007b), « Blunted Stress Reactivity of Elite Sportsmen to Mental Stress ».

Rintala, P., K. Pienimäki, T. Ahonen, M. Cantell et L. Kooistra (1998), « The Effects of Psychomotor Training Programme on Motor Skill Development in Children with Developmental Language Disorders », *Human Movement Science*, vol. 17, n° 4-5, pp. 721-737.

Rona, R.J., L. Li, M.C. Gulliford et S. Chinn (1998), « Disturbed Sleep: Effects of Sociocultural Factors and Illness », *Archives of Disease in Childhood*, vol. 78, pp. 20-25.

Rosenberg, M. (1999), « Non-Violent Communication: A Language of Compassion », PuddleDancer Press, Encinitas, Californie.

Roth, K. et R. Winter (1994), « Entwicklung Koordinativer Fähigkeiten », dans J. Baur, K. Bös et R. Singer (éd.), *Motorische Entwicklung – Ein Handbuch*, Verlag Karl Hofmann, Schorndorf, pp. 191-216.

Rudel, R.G. (1985), « The Definition of Dyslexia: Language and Motor Deficits », dans Frank H. Duffy (éd.), *Dyslexia: A Neuroscientific Approach to Clinical Evaluation*, Little Brown, Boston, Massachussetts, pp.33-53.

Ruoho, K. (1990), *Zum Stellenwert der Verbosensomotorik im Konzept prophylaktischer Diagnostik der Lernfähigkeit bei finnischen Vorschulkindern im Alter von sechs Jahren*, Université de Joensuu, Joensuu.

Schlaug, G. (2003), « The Brain of Musicians », dans I. Peretz et R.J. Zatorre (éd.), *The Cognitive Neuroscience of Music*, Oxford University Press, Oxford, pp. 366-381.

Shield, B.M. et J.E. Dockrell (2004), « External and Internal Noise Surveys of London Primary Schools », *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 115, pp. 730-738.

Siegel, J. (2003), « Why We Sleep », *Scientific American*, novembre.

Simonds, J.F et H. Parraga (1984), « Sleep Behaviors and Disorders in Children and Adolescents Évaluated at Psychiatric Clinics », *Journal of Developmental & Behavioral Pediatrics*, vol. 5, pp. 6-10.

Singer, T., B. Seymour, J. O'Doherty, H. Kaube, R.J. Dolan et C.D. Frith (2004), « Empathy for Pain Involves the Affective but Not Sensory Components of Pain », *Science*, vol. 303, n° 5661, pp. 1157-1162.

Smedje, H., J.E. Broman et J. Hetta (1998), « Sleep Disturbances in Swedish Pre-school Children and their Parents », *Nordic Journal of Psychiatry*, vol. 52, pp. 59-67.

Smedje, H., J.E. Broman et J. Hetta (2001), « Associations between Disturbed Sleep and Behavioural Difficulties in 635 Children Aged Six to Eight Years: A Study Based on Parents' Perceptions », *European Child & Adolescent Psychiatry*, vol. 10, pp. 1-9.

Smith, C. (1996), « Sleep States, Memory Processes and Synaptic Plasticity », *Behavioural Brain Research*, vol. 78, n° 1, pp. 49-56.

Steenari, M.R., V. Vuontela, E.J. Paavonen, S. Carlson, M. Fjällberg et E. Aronen (2003), « Working Memory and Sleep in 6- to 13-year-old Schoolchildren », *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, vol. 42, pp. 85-92.

Stein, M.A. (1999), « Unravelling Sleep Problems in Treated and Untreated Children with ADHD », *Journal of Child & Adolescent Psychopharmacology*, vol. 9, pp. 157-168.

Stickgold, R. (2003), « Human Studies of Sleep and Off-Line Memory Reprocessing », dans P. Maquet, C. Smith et R. Stickgold (éd.), *Sleep and Brain Plasticity*, Oxford University Press, New York, pp. 42-63.

Thompson, R.A. (1994), « Emotional Regulation: A Theme in Search of a Definition », dans N.A. Fox (éd.), *The Development of Emotion Regulation: Biological and Behavioural Considerations. Monographs of the Society for Research in Child Development*, série n° 240, vol. 59, n° 2-3, University of Chicago Press, Chicago, Illinois, pp. 25-52.

Weber, R., U. Ritterfeld et K. Mathiak (2006), « Does Playing Violent Video Games Induce Aggression? Empirical Evidence of a Functional Magnetic Resonance Imaging Study », *Media Psychology*, vol. 8, n° 1, pp. 39-60.

Weinberger, N.M. (2004), « Music and the Brain », *Scientific American*, novembre, pp. 67-73.

Wesnes, K.A., C. Pincock, D. Richardson, G. Helm et S. Hails (2003), « Breakfast Reduces Declines in Attention and Memory Over the Morning in Schoolchildren », *Appetite*, vol. 41, n° 3, pp. 329-331.

Wiggs, L. et G. Stores (2001), « Sleeplessness », dans G. Stores et L. Wiggs (éd.), *Sleep Disturbance in Children and Adolescents with Disorders of Development: its Significance and Management. Clinics in Developmental Medicine*, Cambridge University Press, vol. 155, pp. 24-29.

Winter, R. et K. Roth (1994), « Entwicklung motorischer Fertigkeiten », dans J. Baur, K. Bös et R. Singer (éd.), *Motorische Entwicklung – Ein Handbuch*, Verlag Karl Hofmann, Schorndorf, pp. 217-237.

Wolfson, A.R. et M.A. Carskadon (1998), « Sleep Schedules and Daytime Functioning in Adolescents », *Child Development*, vol. 69, n° 4, pp. 875-887.

Wright, E. (2004), *Generation Kill*, Bantam Press, Londres.

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE I

Chapitre 4

Littératie et cerveau

Quelques-uns d'entre nous savent lire, écrire et un peu compter. Cela ne signifie pas que nous méritons de conquérir l'univers.

Kurt Vonnegut

Ce chapitre propose un état des connaissances en matière de fonctionnement cérébral relatif au langage et à la lecture. Il aide à aborder les questions de savoir « quand » et « comment » la littératie peut être acquise de manière optimale, ainsi qu'à définir quel type d'environnement est souhaitable pour la mettre en place avec efficacité. Une telle information sera utile aux responsables des politiques éducatives concernant le langage et la littératie, aux enseignants, et aux parents qui se demandent comment lire au mieux avec leurs enfants. On s'intéressera particulièrement aux différences entre langues présentant des orthographes « transparentes » (comme le finnois) ou « non transparentes » (comme le français). Pour ce qui est de la dyslexie, on verra ce que les éléments scientifiques présentés dans ce chapitre apportent quant aux stratégies de remédiation.

Votre regard se pose sur les formes arbitraires qui couvrent cette page, et vous voilà en contact avec un autre être humain, qui est assis devant un ordinateur, par une froide après-midi de janvier, à Paris. Les mots passent outre les limites imposées par le temps et l'espace : c'est d'une importance capitale, car cela permet une évolution culturelle cumulative. En lisant ce texte, vous n'êtes pas seulement en contact avec les pensées d'un individu lors d'une unique après-midi; indirectement, vous accédez aussi à la sagesse de toute une culture, de toute une histoire, qui sous-tend ces pensées (Tomasello, 1999). La littératie permet de transmettre l'information au-delà du temps et de l'espace; sans elle, la capacité de l'esprit humain aurait pour limites celles de la mémoire de chacun. La littératie est donc indispensable au progrès.

Pour apprendre à lire, la maîtrise d'un ensemble de compétences complexes est nécessaire. Il faut d'abord apprendre à déchiffrer – les lettres d'un alphabet, des symboles syllabiques ou des idéogrammes. Il faut ensuite comprendre que ces signes correspondent à des sons. Sans la phonétique, les dessins sur la page ne seraient que des formes arbitraires. Dans les langues alphabétiques, la phonétique est également nécessaire – mais non suffisante – pour décoder les mots lorsque l'orthographe de la langue est « non transparente », comme c'est le cas en français ou en anglais[1]. Les correspondances graphèmes-phonèmes (lettres-sons) sont très variables. L'orthographe la plus « irrégulière » de toute est celle de l'anglais : plusieurs centaines de combinaisons de lettres servent à représenter les quarante-deux sons existants. La lecture, en particulier dans des langues dotées d'orthographes non transparentes, nécessite donc la mise en œuvre de stratégies complémentaires en plus du décodage phonologique. On peut par exemple s'aider du contexte, identifier des mots entiers, et remarquer des analogies entre certaines parties de mots, comme *-tion* dans « condition » et « perfection ». La neuroscience a déjà considérablement éclairé ces processus de décodage. Aujourd'hui, c'est en effet au décodage que la recherche en neuroscience s'intéresse principalement. Pourtant, une fois qu'un mot a été décodé, on utilise d'autres compétences pour comprendre le sens du texte; la connaissance sémantique (le sens du mot) ne suffit pas. On a aussi besoin de connaître les règles syntaxiques : « Cyrano aime Roxane » ne veut pas dire la même chose que « Roxane aime Cyrano ». Ensuite, chaque mot doit être associé aux mots déjà lus, ce qui nécessite de coordonner plusieurs composantes de la lecture et la mémoire de travail.

L'ontogenèse des circuits neuraux qui sous-tendent la littératie est guidée par une synergie entre cerveau et expérience. C'est donc dans un cadre centré sur l'étude dynamique du développement que la littératie peut être le mieux analysée. Par exemple, la

1. Dans les langues dotées d'une orthographe non transparente, la correspondance entre les sons et les lettres présente un haut degré de variabilité. Il est souvent impossible de déterminer quel son correspond à un groupe de lettres si on ne dispose pas du mot entier. Par exemple, en anglais, la combinaison de lettres *ghoti* peut se lire « fish » (poisson) si le *gh* est prononcé comme dans « laugh », le *o* comme dans « women » et le *ti* comme dans « nation ». Dans les langues transparentes, en revanche, lettres et sons correspondent presque exactement. Ainsi, le finnois comporte 23 sons pour autant de lettres.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

« théorie des compétences » (« skill theory », Fischer, Immordino-Yang et Waber, 2007) tient que la maîtrise de la lecture peut s'acquérir *via* des types de développement divers. La neuroscience permet donc de mettre au point des méthodes d'enseignement de la lecture plus efficaces et plus complètes.

Langage et sensibilités du développement

Le cerveau est biologiquement préparé à acquérir le langage. Chomsky (1959) postule que le cerveau dispose d'un mode d'emploi permettant de transformer des suites de sons en éléments signifiants, par un processus analogue à la transformation d'information sensorielle en représentation d'objets. L'évolution a fait du cerveau un organe destiné à traiter certains stimuli selon les règles universelles du langage. Il existe en effet des structures cérébrales spécialisées dans le langage. La recherche a mis en évidence le rôle du gyrus frontal inférieur gauche et du gyrus moyen postérieur gauche (respectivement appelés aire de Broca et aire de Wernicke : voir le graphique 2.3). L'aire de Broca, qu'on pensait naguère impliquée dans la production langagière, est aujourd'hui associée à une plus large palette de fonctions linguistiques (Bookheimer, 2002). L'aire de Wernicke s'occupe de sémantique (Bookheimer et autres, 1998; Thompson-Schill et autres, 1999). Il importe de noter que ces structures sont très sophistiquées, et ne se limitent pas à traiter les stimuli auditifs. L'information visuelle peut elle aussi être traitée sur un plan linguistique : c'est le cas avec les langues des signes.

Certaines structures cérébrales sont biologiquement préparées à gérer le langage, mais celui-ci ne peut pas s'acquérir sans l'expérience. Il existe des sensibilités du développement (les « fenêtres d'opportunité » présentées dans le chapitre 1) telles que les circuits de traitement du langage sont plus réceptifs aux modifications dépendantes de l'expérience à certaines périodes de la vie. À la naissance, les bébés sont capables de distinguer des nuances phonétiques subtiles dans un spectrogramme continu, mais au cours des dix premiers mois de la vie le contact avec une langue donnée modèle le cerveau en fonction des sons utilisés dans cette langue (Gopnik, Meltzoff et Kuhl, 1999). Ainsi, les phonèmes *d* et *ḍ* (appelé « d emphatique ») se trouvent-ils le long d'un spectre continu, et tous les nouveaux-nés les perçoivent ainsi. Mais le cerveau de bébés plongés dans un environnement arabophone se modifie peu à peu pour finir par percevoir ce spectrogramme comme deux catégories distinctes, *d* et *ḍ*. Ils développent une représentation prototypique de chaque phonème, et les sons du spectrogramme sont classés dans la catégorie *d* ou *ḍ*. À l'opposé, les bébés plongés dans d'autres environnements linguistiques (qui ne présentent pas cette distinction phonétique, comme en français, par exemple) ne construisent pas ces prototypes, car la distinction entre *d* et *ḍ* n'est pas pertinente dans leur langue; ils en construisent d'autres, adaptés à leur langue maternelle, et vers l'âge de 10 mois ils perdent effectivement la capacité à distinguer *d* et *ḍ*. Ce phénomène se produit dans de nombreuses langues et pour diverses distinctions phonémiques (Gopnik, Meltzoff et Kuhl, 1999). Le cerveau semble donc « pré-réglé » pour acquérir les prototypes des catégories phonémiques des langues auxquelles il est exposé dans les dix premiers mois de la vie[2].

2. Il est néanmoins possible d'apprendre à distinguer des sons à l'âge adulte. Ainsi, McClelland, Fiez et McCandliss (2002) ont montré que des adultes japonais peuvent apprendre à faire la différence entre /r/ et /l/ – contraste qui est étranger à la langue japonaise – grâce à un entraînement comportant une exposition répétée à des *r* et des *l* exagérés.

Il existe également une sensibilité du développement pour l'apprentissage de la grammaire. Plus tôt on apprend une langue, mieux le cerveau peut en maîtriser la grammaire (Neville et Bruer, 2001). Si, entre 12 mois et 3 ans, un enfant est exposé à une langue étrangère, c'est son hémisphère gauche qui traitera la grammaire, comme chez les locuteurs natifs. Si on attend que l'enfant ait entre 4 et 6 ans, le cerveau utilise les deux hémisphères pour traiter l'information grammaticale. Si l'exposition à la langue ne commence qu'entre 11 et 13 ans, les techniques d'imagerie cérébrale montrent un schéma d'activation encore plus diffus. Cette évolution montre que le cerveau n'applique pas la même stratégie selon l'âge des premiers contacts avec une langue étrangère, ce qui est corroboré par les observations des comportementalistes : plus tard on est exposé à une seconde langue, plus nets sont les déficits des processus de traitement grammatical (Fledge et Fletcher, 1992). Il semble qu'être exposé tôt à une langue étrangère permette de développer des stratégies de traitement langagier très efficaces, et qu'y être exposé plus tard entraîne la mise en œuvre de stratégies différentes et moins efficaces.

De plus, il existe une période sensible pour l'acquisition des accents (Neville et Bruer, 2001). C'est avant l'âge de 12 ans qu'on intègre le mieux cet aspect du traitement phonologique. Cela est néanmoins très variable, car les sensibilités du développement concernent des fonctions linguistiques très spécifiques. D'autres aspects de la phonologie ne connaissent donc pas de période sensible.

Des résultats convergents semblent mettre en évidence une relation inverse entre l'âge et l'efficacité de l'apprentissage pour de nombreux aspects des langues : plus jeune est l'apprenant, plus efficace se révèle l'apprentissage. Malgré cela, les politiques éducatives de bien des pays ne font débuter les cours de langues étrangères qu'à l'adolescence. Il est nécessaire de continuer les recherches pour obtenir un panorama complet des sensibilités de développement concernant différents aspects du langage, mais en l'état actuel des connaissances, il est clair que :

Plus l'apprentissage d'une langue étrangère se produit tôt, plus il sera efficace.

Les cours doivent cependant respecter les caractéristiques de chaque tranche d'âge. Il serait inutile d'appliquer dans les écoles maternelles l'enseignement systématique proposé en lycée. Les cours doivent être adaptés à l'âge des enfants.

Même s'il est plus efficace d'apprendre une langue pendant l'enfance, on peut le faire à tout âge. Adolescents et adultes auront simplement plus de mal. Mais s'ils sont plongés dans une autre langue, ils pourront la parler fort « bien »; certains aspects (comme l'accent[3]) ne seront pas aussi bien maîtrisés que s'ils l'avaient apprise plus tôt. Il existe cependant des différences individuelles, et l'intensité comme la durée des sensibilités du développement varient selon les gens. Certains adultes restent donc capables de maîtriser presque tous les aspects d'une langue étrangère.

3. Le bénéfice, pour un locuteur non natif, d'acquérir dans une langue donnée un « accent » comparable à celui d'un locuteur natif est loin d'être évident. Tant que l'on peut se faire comprendre, où est le problème ? Est-ce si grave d'avoir « un accent étranger »? Bien souvent cependant, les systèmes éducatifs semblent partir du principe que le but de tout apprenant dans une langue étrangère est (ou devrait être) d'atteindre le « niveau » d'un locuteur natif (lequel, d'ailleurs ?), que ce soit en matière de phonétique ou pour d'autres aspects de la langue.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

La littératie au niveau cérébral

Si l'évolution a débouché sur l'apparition de structures cérébrales dédiées au langage, il n'y en a pas pour l'acquisition de la littératie. L'expérience de l'écrit ne déclenche donc pas de processus biologiquement programmé, contrairement à l'expérience du langage parlé. Il faut créer la compétence *via* une série de modifications neurales. Selon Pinker (1995), « les enfants sont prééquipés pour le son, mais l'écrit est un accessoire en option, qu'il faut se donner du mal pour installer ». Le contact avec l'écrit permet de construire graduellement des circuits neuraux capables de traiter la lecture.

L'expérience jouant un rôle crucial dans l'élaboration de circuits neuraux, les capacités de prélecture des jeunes enfants peuvent être grandement influencées par leur environnement familial. Ainsi, Hart et Risley (2003) ont montré qu'aux États-Unis, les enfants de 3 ans issus de milieux socio-économiques désavantagés ont été exposés à 30 millions d'occurrences de mots de moins que les autres enfants. Un tel contact avec la langue est peut-être trop limité pour que des capacités de prélecture se développent, ce qui menacerait le développement ultérieur de la littératie. Ces enfants sont sans doute capables de rattraper le terrain perdu, mais ils le font rarement (Wolf, 2007).

Il est donc important de s'assurer que tous les enfants ont la possibilité de développer leurs capacités de prélecture.

Le cerveau n'est pas biologiquement fait pour apprendre à lire, mais il est biologiquement fait pour s'adapter à l'expérience. De plus, il est équipé de circuits langagiers capables de traiter les données visuelles. La plasticité cérébrale permet d'utiliser les structures langagières pour établir des circuits neuraux dédiés à la littératie. On dit souvent que la littératie se construit « autour » du langage. Selon la métaphore de Vygotski, la littératie s'échafaude à partir des structures langagières (Vygotski, 1978).

Il serait donc bon que les scientifiques étudient la possibilité que les sensibilités du développement concernant certains aspects de l'acquisition du langage influencent l'apprentissage de la lecture. Les sensibilités du développement pour l'apprentissage de la grammaire pourraient ainsi déterminer le meilleur moment pour enseigner la grammaire à l'école. En déterminant des influences nettes, on pourrait ajuster les politiques éducatives de façon à enseigner au « bon » moment les diverses compétences nécessaires à la lecture, et peut-être mettre davantage l'accent sur le développement de la pré-lecture à l'école maternelle.

La science connaît de mieux en mieux les aires corticales utilisées pour lire. Aujourd'hui, la modélisation la plus complète et la mieux étayée est la théorie des deux voies (Jobard, Crivello et Tzourio-Mazoyer, 2003), qui fournit un cadre permettant de décrire les processus cérébraux en jeu lors de la lecture au niveau du mot. Quand vous regardez les mots imprimés sur cette page, c'est d'abord le cortex visuel primaire qui traite le stimulus. Ensuite, un traitement prélexical est effectué par la jonction occipito-temporale gauche. La théorie des deux voies tient que le traitement de l'information suit alors l'un ou l'autre de deux itinéraires complémentaires : par assemblage et par adressage. La voie par *assemblage* passe d'abord par une étape de conversion grapho-phonologique (dans certaines aires temporales gauches et frontales, dont l'aire de Broca). La voie par *adressage*, elle, consiste à faire passer directement l'information du traitement prélexical à la compréhension sémantique. Les deux voies aboutissent dans l'aire temporale basale gauche, le gyrus frontal intérieur gauche, et le gyrus moyen postérieur gauche ou aire de Wernicke. L'observation de la voie menant directement à la compréhension sémantique a donné

naissance à l'hypothèse d'une « aire de reconnaissance visuelle des mots » (VWFA pour « visual word form area ») à la jonction ventrale entre le lobe occipital et le lobe temporal. On a d'abord supposé qu'elle contenait un lexique visuel permettant d'identifier directement des mots entiers. Mais des recherches récentes indiquent qu'elle serait en fait constituée de nombreuses aires adjacentes, chacune étant spécialisée dans un aspect des chaînes de caractères : longueur ou ordre des mots, par exemple. Le processus partant du traitement visuel (voir) pour aboutir aux inférences sémantiques (comprendre) est très rapide : il prend environ 600 millisecondes.

Mieux comprendre la façon dont le cerveau gère la littératie permettrait d'améliorer l'enseignement de la lecture. L'importance simultanée du traitement phonologique et du traitement sémantique direct peut alimenter la réflexion sur les approches montante et descendante, donc le débat entre immersion dans le texte et développement de l'analyse phonétique. On peut donc supposer que :

Idéalement, l'enseignement de la lecture combine sans doute l'approche syllabique et la méthode globale[4].

D'ailleurs, des rapports du United States' National Reading Panel (2000) et du National Research Council (Snow, Burns et Griffin, 1998) confirment l'efficacité supérieure d'une méthode mixte d'enseignement de la lecture en anglais. Plus les études sur la lecture seront nombreuses et pertinentes, moins les débats sur les méthodes d'apprentissage se fonderont sur des idéologies, des croyances ou des résultats statistiques; ils seront de plus en plus ancrés à des faits scientifiquement établis.

La neuroscience commence seulement à étudier la lecture au niveau de la phrase. Les premiers résultats semblent montrer que les opérations syntaxiques et la mémoire de travail qui les rend possibles partagent des substrats neuraux dans les modalités auditive et visuelle (Caplan, 2004). Cela implique que les opérations de lecture au niveau de la phrase nécessitent l'intervention de structures dédiées aux fonctions correspondantes du langage parlé.

L'influence de la langue sur le développement de la littératie

Une grande partie des circuits cérébraux permettant la lecture est commune à toutes les langues, mais il existe des différences importantes. La littératie est due à la colonisation de structures cérébrales (dont celles spécialisées dans le langage et certaines plus adaptées à d'autres fonctions indispensables). Les opérations communes à la parole et au langage écrit (sémantique, syntaxe et utilisation de la mémoire de travail) font donc appel aux structures langagières, biologiquement déterminées et communes à toutes les langues. De plus, des contraintes biologiques déterminent quelles structures neurales sont le mieux à même de traiter les autres fonctions permettant la lecture. Une grande part des circuits de lecture est donc commune à toutes les langues. Mais selon la langue concernée, la lecture

4. Cette idée doit être nuancée. La recherche cérébrale débouchant sur la théorie des deux voies a principalement été menée sur des locuteurs anglophones dont la littératie s'est développée de façon normale. Les choses pourraient être différentes dans le cas d'enfants apprenant à lire dans une langue autre que l'anglais, ou chez qui la littératie se développe de façon atypique. Les conclusions atteintes ne sont pas forcément transférables à d'autres langues dont l'orthographe est plus transparente ou dont le système d'écriture est non alphabétique. Il est intéressant de noter qu'une large part de la recherche anglo-saxonne, travaillant (inconsciemment) sur un cas extrême, ne semble pas avoir considéré cet aspect essentiel des choses. Ce n'est que récemment que certains chercheurs ont pris conscience de ce problème.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

requiert parfois de faire appel à des fonctions particulières : les stratégies de décodage ou de reconnaissance morphologique peuvent varier. Ces fonctions-là sont souvent effectuées par des structures cérébrales distinctes.

La théorie des deux voies, développée surtout d'après des recherches menées sur des locuteurs anglophones, doit sans doute être modifiée pour pouvoir s'appliquer aux langues dotées d'orthographes moins complexes, et n'est peut-être qu'en partie pertinente pour des langues non alphabétiques. La voie par adressage, non phonologique, d'accès au sens, est sans doute moins utile dans des langues transparentes comme l'italien, que dans des langues non transparentes comme le français. La formation de cette voie peut donc varier selon les langues, en fonction de leur structure orthographique. La recherche sur le cerveau soutient cette hypothèse. L'aire de reconnaissance visuelle des mots (VWFA) occipito-temporale impliquée dans l'identification du sens des mots d'après des propriétés non phonologiques chez les anglophones semble avoir un rôle moins critique chez les italophones (Paulesu et autres, 2001a). Des résultats préliminaires suggèrent que le cerveau de ceux dont l'italien est la langue maternelle utilise pour lire une stratégie plus efficace que les anglophones natifs, même quand ces italophones lisent un texte en anglais : les circuits cérébraux qui sous-tendent la lecture ne se développent pas de la même façon chez les italophones que chez les anglophones.

Une théorie psycho-linguistique récente conçoit la détermination des stratégies de lecture comme fonction de la complexité orthographique des langues[5], c'est-à-dire en fonction de la taille minimale des unités de décodage. Du pur décodage de phonèmes (la plus petite unité possible) au décodage mixte (phonèmes et unités plus longues – rimes, syllabes, commencements de mots, mot entiers), tout un éventail de stratégies sont possibles. Cette théorie explique que la complexité orthographique d'une langue détermine la stratégie de lecture choisie par le cerveau : plus la langue est transparente, plus petite sera l'unité moyenne des représentations lexicales utilisée pour le décodage. Cela pourrait expliquer les résultats obtenus par les comportementalistes qui montrent que la durée de l'apprentissage de la lecture est à peu près proportionnelle au degré de complexité orthographique de la langue. Cela signifierait aussi que les méthodes d'apprentissage pourraient être plus ou moins efficaces selon les langues, et donc que :

Il est possible que l'équilibre idéal entre méthodes phonétique et globale varie selon la langue.

La recherche indique que la représentation morphologique influence aussi le développement de la littératie au niveau cérébral. Les techniques d'imagerie cérébrale ont montré que les locuteurs chinois utilisent davantage d'aires cérébrales que les anglophones, et que celles-ci sont activées lorsque des Chinois lisent un texte en anglais (Tan et autres, 2003). Plus précisément, les sinophones utilisent le gyrus frontal moyen gauche et le gyrus pariétal postérieur, souvent associés à l'entretien du traitement de l'information spatiale et à la coordination des ressources cognitives. La raison pour laquelle ces aires cérébrales sont ainsi utilisées est sans doute que les caractères chinois (idéogrammes) nécessitent un traitement spatial pour être associés à une représentation phonologique syllabique. La plus grande part des circuits neuraux permettant la lecture est commune aux langues alphabétiques et non alphabétiques, mais certaines structures sont propres aux unes ou aux autres : elles correspondent sans doute à une tendance plus

5. Usha Goswami et Johannes Ziegler (2005), « Atelier sur l'apprentissage de la lecture » coorganisé par l'Université de Cambridge et le CERI, 29-30 septembre 2005, Cambridge, Royaume-Uni.

marquée au traitement par adressage ou par assemblage (Yiping, Shimin et Iversen, 2002). Mis en parallèle avec les observations relatives à la complexité orthographique (transparente vs. non-transparente) et aux stratégies de lecture, ces résultats montrent que certains aspects de la littératie sont construits différemment dans le cerveau selon qu'on est en contact avec une langue donnée.

Ces travaux soulignent l'importance de prendre en compte les aspects liés au développement quand on réfléchit à l'apprentissage de la lecture. D'ailleurs, les circuits neuraux utilisés pour lire changent à mesure que les enfants apprennent. Ainsi, Pugh[6] a mis en évidence une modification de la neuro-anatomie fonctionnelle à l'œuvre dans les aspects initiaux de la lecture : au départ situés dans diverses zones temporales, frontales, et l'hémisphère droit, les aires activées chez le lecteur anglophone se déplacent ensuite pour se regrouper plus nettement dans la région occipito-temporale de l'hémisphère gauche.

De nombreuses analyses de ces travaux, centrées à la fois sur l'âge et les capacités de lecture, ont montré que l'élément déterminant est le niveau de lecture : le développement de la littératie dépend donc de l'expérience et non de la simple maturation du cerveau. Puisque la littératie se construit dans le cerveau par un développement progressif :

Le niveau de lecture est probablement plus efficacement évalué de façon formative.

D'ailleurs, l'évaluation formative (tests réguliers permettant d'identifier les besoins de l'apprenant, et d'y répondre) améliore le niveau des élèves, permet une plus grande équité dans les résultats, et augmente la capacité d'apprentissage (OCDE, 2005).

La recherche va préciser la relation entre les expériences spécifiques et leurs conséquences sur le développement des circuits cérébraux de lecture, et cela rendra ces travaux de plus en plus pertinents pour le domaine éducatif. Par exemple, s'il est confirmé qu'être en contact tôt dans la vie avec la forme écrite d'une langue transparente permet de développer des stratégies de lecture plus efficaces, il serait intéressant d'envisager de permettre aux enfants parlant des langues non transparentes de construire ces mêmes circuits. On pourrait par exemple utiliser pour apprendre à lire des livres ne contenant que des mots dans lesquels les correspondances graphèmes-phonèmes sont « cohérentes ». Une autre possibilité, plus radicale, consisterait à modifier l'orthographe des langues non transparentes afin de leur donner davantage de cohérence interne[7].

Dyslexie développementale

Le développement de la littératie au niveau cérébral doit énormément à l'expérience, mais la biologie joue aussi un rôle important. Puisque la lecture se construit « autour » des structures langagières, si celles-ci diffèrent d'une personne à l'autre pour des raisons biologiques, les conséquences sur la lecture peuvent être importantes. Beaucoup d'enfants peinent à apprendre à lire uniquement à cause de leurs caractéristiques corticales atypiques : on dit qu'ils souffrent de dyslexie développementale. Il s'agit d'un déficit du

6. Première conférence commune des réseaux « Littératie » et « Numératie » mis en place par le CERI, janvier 2003, Brockton/Massachussetts, États-Unis.
7. Le fait que les plus récentes tentatives en ce sens, en français d'abord et en allemand ensuite, se soient soldées respectivement par un échec complet et par un demi-échec ne signifie pas que de telles réformes soient totalement impossibles à mettre en œuvre. Les cas de l'espagnol et du turc le prouvent…

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

langage d'origine neurobiologique, caractérisé par des difficultés de lecture chez des enfants dont le niveau d'intelligence et de motivation est normal[8]. En voici la définition :

> La dyslexie est un trouble d'apprentissage de la lecture d'origine neurobiologique. Elle se caractérise par des difficultés à identifier les mots de façon précise et/ou aisée, et par un faible niveau d'orthographe et d'encodage, souvent dûs à un déficit de la composante phonologique du langage. Ce déficit est souvent inattendu en regard des capacités cognitives de l'enfant et de la qualité de l'enseignement proposé (Lyon et autres, 2003, p. 2).

La dyslexie est très répandue[9]. C'est le plus courant des troubles de l'apprentissage, et il traverse les frontières culturelles, socio-économiques et, dans une certaine mesure, linguistiques. Le déficit phonologique qui sous-tend la dyslexie semble commun à toutes les langues alphabétiques, mais le degré de sa manifestation, et donc les conséquences sur la lecture, peut varier selon la structure orthographique de chaque langue (Paulesu et autres, 2001). De plus, et puisqu'on fait appel, pour lire dans des langues non alphabétiques, à des circuits neuraux différents, la dyslexie dans ces langues peut avoir des manifestations qualitativement différentes. Les implications des recherches menées sur la dyslexie dans des langues alphabétiques ne sont donc pas forcément transférables à des langues non alphabétiques.

8. Lorsqu'on découvre qu'une difficulté d'apprentissage est due à un « problème cérébral », on est d'abord tenté de la croire irrémédiable par des moyens purement éducatifs. Mais on peut aussi retourner ce raisonnement et considérer que lorsque les outils de la neuroscience cognitive permettent de décomposer une compétence en une série d'étapes de traitement et de modules fonctionnels distincts, il devient possible de concevoir des programmes de remédiation efficients. C'est précisément ce qu'ont fait Bruce McCandliss et Isabelle Beck dans le cas de la dyslexie, s'appuyant sur les composants intacts de la capacité de lecture chez les enfants dyslexiques pour développer une nouvelle méthode d'enseignement de la prononciation des mots. Bien entendu, une telle compréhension de la décomposition d'une compétence en processus cognitifs distincts peut également permettre de développer de meilleures méthodes d'enseignement destinées aux enfants ne souffrant pas de dyslexie. En utilisant leur méthode de « construction des mots » (« Word Building Method »), McCandliss et Beck ont montré que les enfants dyslexiques sont capables d'apprendre à lire. Aider des enfants à généraliser à partir de leur expérience de la lecture les rend capables de transférer sur de nouveaux mots ce qu'ils ont déjà appris sur des mots connus. Ces compétences, parmi lesquelles figurent le décodage alphabétique et la construction de mots, permettent à des enfants en difficulté d'apprendre à prononcer un nombre sans cesse croissant de nouveaux mots. Cette méthode leur apprend qu'on peut construire une grande quantité de mots à partir d'un petit ensemble de lettres. Comme nombre d'enfants d'âge scolaire ont des difficultés de lecture, s'atteler à ce problème permet à cette population d'apprenants de participer à la forme d'échange linguistique la plus fondamentale qui soit et diminue le risque de leur marginalisation. D'autres chercheurs, notamment Paula Tallal et Michael Merzenich, ont obtenu des résultats semblables avec une technique différente. Bien que ces résultats soient quelque peu controversés, leur méthode semble bel et bien en mesure d'aider au moins certains enfants. Le plus important, toutefois, n'est pas de déterminer si telle méthode est plus efficace que telle autre, mais de souligner le fait qu'il existe des outils théoriques et méthodologiques permettant de s'attaquer au problème, et que des progrès visibles sont constatés. Beaucoup, à l'image d'Emile Servan-Schreiber, prédisent que l'étude et le traitement de la dyslexie déboucheront dans un avenir relativement proche sur l'une des réussites les plus éclatantes de la neuroscience cognitive.
9. Il est difficile d'évaluer l'incidence relative de la dyslexie à un niveau international, en partie parce que la définition du concept varie d'un pays à l'autre (et n'obéit généralement qu'à une logique économique). Comme il a été recommandé en 2004 (seconde conférence commune des réseaux « Littératie » et « Numératie » mis en place par le CERI, mars 2004, El Escorial, Espagne), et confirmé par les études de Kayoko Ishii (2005), une définition scientifique de certains troubles de l'apprentissage, comme la dyslexie et la dyscalculie, aiderait les chercheurs (et les décideurs) à mettre en place des définitions internationalement reconnues, qui permettraient, entre autres choses, d'établir des comparaisons internationales.

La dyslexie se manifeste sous bien des aspects, mais, dans les langues alphabétiques, elle correspond souvent à des caractéristiques corticales atypiques dans la région pariéto-temporale postérieure gauche et la région occipito-temporale postérieure gauche (Shaywitz et Shaywitz, 2005; Shaywitz et autres, 2001). Les conséquences fonctionnelles en sont des difficultés à traiter les éléments sonores de la langue. Les enfants présentant une dyslexie développementale semblent avoir des représentations phonémiques imprécises, ce qui les gêne pour identifier et manipuler les phonèmes. Sur le plan linguistique, les conséquences en sont relativement minimes et peuvent comprendre des difficultés de prononciation, une non-sensibilité aux rimes ou une confusion des mots à la prononciation similaire. Mais les conséquences pour la littératie peuvent être énormes, car relier les phonèmes aux symboles écrits est indispensable à toute lecture dans une langue alphabétique.

Néanmoins, on a récemment identifié les particularités corticales responsables des déficits phonologiques, et il est à présent possible de mettre au point des interventions ciblées. Des expériences ont montré que les circuits concernés sont très plastiques. Un traitement centré sur la phonologie peut permettre à des enfants de développer leurs circuits neuraux dans les zones cérébrales appropriées (à l'arrière de l'hémisphère gauche) de manière à lire vite et bien (Shaywitz et autres, 2004). Le cerveau peut également compenser en créant d'autres circuits dans l'hémisphère droit, qui assurent une lecture fiable quoique lente (Shaywitz, 2003). Les interventions semblent plus efficaces avec de jeunes enfants; il semble donc exister une période sensible pour développer les compétences phonétiques des enfants présentant un gyrus pariéto-temporal et un gyrus occipito-temporal gauches atypiques (Lyytinen et autres, 2005; Shaywitz, 2003; Torgesen, 1998). Les scientifiques sont aujourd'hui capables d'identifier les bébés risquant de développer une dyslexie, ce qui permet d'intervenir assez tôt (Lyytinen et autres, 2005). Ces résultats suggèrent que :

Les interventions visant à développer les compétences phonologiques aident souvent les enfants dyslexiques à apprendre à lire[10].

Il est important d'identifier tôt les enfants dyslexiques, car les interventions sont généralement d'autant plus efficaces qu'elles sont précoces.

De plus, la neuroscience peut bouleverser notre conception de la dyslexie. La confirmation de la plasticité des circuits cérébraux responsables de la dyslexie va permettre aux éducateurs de mettre au point des interventions efficaces et ciblées, et la dyslexie cessera d'être un handicap pouvant empêcher l'apprentissage pour devenir un modèle développemental alternatif débouchant au même résultat : un cerveau capable de lire normalement. Cela pourrait avoir bien des conséquences positives en classe; entre autres, assurer aux enfants une lecture autonome, ce qui est étroitement lié à la qualité des résultats obtenus (Bandura, 1993).

On comprend de mieux en mieux que la dyslexie est bien davantage un type de développement alternatif qu'un handicap insurmontable.

La neuroscience se révèle extrêmement efficace pour concevoir des interventions ciblées afin d'aider les enfants souffrant de déficits phonologiques; c'est prometteur quant aux recherches sur les moyens de remédiation à d'autres anomalies corticales. La neuroscience permettra aux éducateurs de différencier des étiologies aux manifestations similaires et peut

10. Dans bien des cas, mais pas de manière systématique. Toutefois, les résultats les plus étonnants à ce jour (en matière de diagnostic et de remédiation précoces) sont sans doute ceux obtenus par Heikki Lyytinen à l'Université de Jÿvaskÿla (Finlande). Mais Lyytinen et son équipe travaillent sur une langue extrêmement transparente. Il reste à mesurer la transférabilité de leurs découvertes.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

être utilisée pour étudier d'autres types de dyslexies, comme celle qui entraîne une faible vitesse d'identification des mots (Wolf, 2007). De plus, et puisque l'efficacité des interventions varie avec l'âge et l'expérience de lecture, la recherche doit continuer à s'intéresser aux diverses trajectoires développementales de la dyslexie. Il faudrait également étudier les différences de ces trajectoires selon les langues, car la complexité de la structure orthographique d'une langue ou sa représentation morphologique influe certainement sur la façon dont la dyslexie se manifeste[11].

Conclusions

La recherche en neurobiologie modifie le concept de littératie de deux façons. Elle permet d'une part de comprendre plus précisément ce qu'est la littératie. Elle facilite la décomposition des processus en substrats neuraux sous-jacents. Cette analyse plus précise peut aider à concevoir des méthodes d'enseignement efficaces. Par exemple, la coexistence des modes de traitement phonologique et sémantique indique que des méthodes mixtes sont sans doute les plus adaptées, tout du moins dans des langues non transparentes et pour des enfants dont le développement est « normal ». On peut aussi définir les différentes étiologies des troubles de la lecture en fonction des sous-composantes neurales de la littératie, ce qui permettrait d'établir des interventions ciblées.

D'autre part, la neuroscience permet de mieux comprendre le développement de la littératie. Les circuits neuraux à l'œuvre sont plastiques et se construisent avec le temps. La création de la littératie dans le cerveau peut donc se faire de plusieurs façons. La comparaison entre plusieurs langues et la recherche sur la dyslexie montrent qu'il existe de nombreuses voies développementales permettant d'apprendre à lire. Des contraintes environnementales ou biologiques peuvent rendre l'une ou l'autre de ces voies plus adaptée à certains enfants. À mesure que la neuroscience va établir les relations entre chaque type d'intervention et de développement neurobiologique, les éducateurs pourront cibler leurs méthodes en fonction des voies possibles. La neuroscience facilite en cela un enseignement personnalisé, capable de prendre en compte une large gamme de différences individuelles, et peut donc faire de la littératie un concept inclusif au lieu de sélectif. Cela aurait des conséquences très importantes. « Il est terrible de gâcher un esprit ». À mesure que les gens sauront mieux lire, la matière première permettant l'évolution culturelle se fera plus abondante, et le progrès humain en sera facilité.

11. Bien que la plupart des formes de dyslexie semblent être dues à un dysfonctionnement du traitement phonologique, il est possible que certaines formes de ce trouble aient de toutes autres causes, qui se substitueraient ou viendraient s'additionner à la première. D'autres recherches sont nécessaires pour confirmer l'existence d'autres causes potentielles de la dyslexie.

Références

Bandura, A. (1993), « Perceived Self-efficacy in Cognitive Development and Functioning », *Educational Psychologist,* vol. 28, pp. 117-148.

Bookheimer S. (2002), « Functional MRI of Language: New Approaches to Understanding the Cortical Organization of Semantic Processing », *Annu. Rev. Neurosci.,* vol. 25, pp. 151-188.

Bookheimer, S.Y., T.A. Zeffiro, T. Blaxton, W.D. Gaillard, B. Malow et W.H. Theodore (1998), « Regional Cerebral Blood Flow during Auditory Responsive Naming: Evidence for Cross-Modality Neural Activation », *NeuroReport,* vol. 9, pp. 2409-2413.

Caplan, D. (2004), « Functional Neuroimaging Studies of Written Sentence Comprehension », *Scientific Studies of Reading,* vol. 8, n° 3, pp. 225-240.

Chomsky, N.A. (1959), « Review of B.F. Skinner's Verbal Behavior », *Language*, vol. 38, n° 1, pp. 26-59.

Fischer, K.W., M.H. Immordino-Yang et D. Waber (2007), « Toward a Grounded Synthesis of Mind, Brain, and Education for Reading Disorders: An Introduction to the Field and this Book », dans K.W. Fischer, J.H. Bernstein et M.H. Immordino-Yang (éd.), *Mind, Brain, and Education in Learning Disorders*, Cambridge University Press, MA, pp. 1-20.

Fledge, J. et K. Fletcher (1992), « Talker and Listener Effects on Degree of Perceived Foreign Accent », *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, pp. 370-389.

Gopnik, A., A.N. Meltzoff et P.K. Kuhl (1999), *The Scientist in the Crib: What Early Learning Tells Us About the Mind*, HarperCollins Publishers Inc., NY.

Hart, B. et T.R. Risley (2003), « The Early Catastrophe: The 30 Million Word Gap », *American Educator,* vol. 27, n° 1, pp. 4-9.

Ishii, K. (2005), « Strategies for Reading and Writing Learning Difficulties (Dyslexia) », dans Science and Technology Trends, Quarterly Review No. 15, avril 2005 (original en japonais 2004).

Jobard, G., F. Crivello et N. Tzourio-Mazoyer (2003), « Evaluation of the Dual Route Theory of Reading: A Metanalysis of 35 Neuroimaging Studies », *NeuroImage*, vol. 20, pp. 693-712.

Lyon, G.R., S.E. Shaywitz et B.A. Shaywitz (2003), « A Definition of Dyslexia », *Ann Dyslexia*, vol. 53, pp. 1-14.

Lyytinen, H., T.K. Guttorm, T. Huttunen, J.H. Paavo, H.T. Leppänen et M. Vesterinen (2005), « Psychophysiology of Developmental Dyslexia: A Review of Findings Including Studies of Children at Risk for Dyslexia », *Journal of Neurolinguistics*, vol. 18, n° 2, pp. 167-195.

McClelland, J.L, J.A. Fiez et B.D. McCandliss (2002), « Teaching the /R/–/l Discrimination to Japanese Adults: Behavioral and Neural Aspects », *Physiology and Behavior*, vol. 77, pp. 657-662.

National Reading Panel (2000), « Teaching Children to Read: An Evidence-based Assessment of the Scientific Research Literature on Reading and its Implications for Reading Instruction », National Institute of Child Health and Human Development, Washington DC.

Neville, H.J. et J.T. Bruer (2001), « Language Processing: How Experience Affects Brain Organization », dans D.B. Bailey, Jr., J.T. Bruer, F.J. Symons et J.W. Lichtman (éd.), *Critical Thinking about Critical Periods*, Paul H. Brookes Publishing, Baltimore, MD, pp. 151-172.

OCDE (2005), *L'évaluation formative : pour un meilleur apprentissage dans les classes secondaires*, OCDE, Paris.

Paulesu, E., J. Démonet, F. Fazio, E. McCrory, V. Chanoine, N. Brunswick, S.F. Cappa, G. Cossu, M. Habib, C.D. Frith et U. Frith (2001), « Dyslexia: Cultural Diversity and Biological Unity », *Science*, vol. 291, n° 5511, pp. 2165-2167.

Pinker, S. (1995), « The Language Instinct. How the Mind Creates Language », Harper Collins, New York.

Shaywitz, S.E. (2003), *Overcoming Dyslexia,* Random House Inc., NY.

Shaywitz, S.E. et B.A. Shaywitz (2005), « Dyslexia », *Biological Psychiatry,* vol. 57, n° 11, pp. 1301-1309.

Shaywitz, B.A., S.E. Shaywitz, B.A. Blachman, K.R. Pugh, R.K. Fulbright, P. Skudlarski, W.E. Mencl, R.T. Constable, J.M. Holahan, K.E. Marchione, J.M. Fletcher, G.R. Lyon et J.C. Gore (2004), « Development of Left Occipito-temporal Systems for Skilled Reading in Children after a Phonologically-based Intervention », *Biol. Psychiatry,* vol. 55, pp. 926-933.

Shaywitz, B.A., S.E. Shaywitz, K.R. Pugh, R.K. Fulbright, W.E. Mencl, R.T. Constable, P. Skudlarski, J.M. Fletcher, G. Reid et J.C. Gore (2001), « The Neurobiology of Dyslexia », *Clinical Neuroscience Research,* vol. 1, n° 4, pp. 291-299.

Snow, G.E., M.S. Burns et P. Griffin (éd.) (1998), « Preventing Reading Difficulties in Young Children », Committee on the Prevention of Reading Difficulties in Young Children, Washington, DC.

Tan, L.H., J.A. Spinks, C.M. Feng, W.T. Siok, C.A. Perfetti, J. Xiong et autres (2003), « Neural Systems of Second Language Reading are Shaped by Native Language », *Human Brain Mapping,* vol. 18, pp. 158-166.

Thompson-Schill, S.L., G. Aguirre, M. D'Esposito et M.J. Farah (1999), « A Neural Basis for Category and Modality Specifics of Semantic Knowledge », *Neuropsychologia*, vol. 37, pp. 671-676.

Tomasello, M. (1999), « The Cultural Origins of Human Cognition », Harvard University Press, MA.

Torgesen, J.K. (1998), « Catch them before they Fall: Identification and Assessment to Prevent Reading Failure in Young Children », *American Educator*, vol. 22, pp. 32-39.

Vygotsky, L.S. (1978), « Mind and Society: The Development of Higher Mental Processes », Harvard University Press, Cambridge, MA.

Wolf, M. (sous presse), « A Triptych of the Reading Brain: Evolution, Development, Pathology and its Interventions », dans K.W. Fischer, J.H. Bernstein et M.H. Immordino-Yang (éd.), *Mind, Brain, and Éducation in Learning Disorders*, Cambridge University Press, MA, pp. 1-20.

Yiping, C., F. Shimin et D. Iversen (2002), « Testing for Dual Brain Processing Routes in Reading: A Direct Contrast of Chinese Character and Pinyin Reading Using fMRI », *Journal of Cognitive Neuroscience,* vol. 14, pp. 1088-1098.

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE I

Chapitre 5

Numératie et cerveau

… la science du calcul est également indispensable jusqu'à l'extraction des racines carrées et cubiques, l'algèbre jusqu'aux équations du second degré, et la maîtrise des logarithmes est souvent précieuse, même dans la vie courante. Mais au-delà, tout n'est que luxe; un luxe délicieux certes, mais pas de ceux que peut s'offrir quelqu'un qui doit travailler pour vivre.

Thomas Jefferson

Ce chapitre décrit le complexe fonctionnement cérébral en jeu lorsque l'individu développe des compétences en numératie, ce qui inclut la compréhension du concept de nombre, les opérations arithmétiques simples, et les premières explorations de l'algèbre. Il en ressort des implications pour l'enseignement des mathématiques. Les obstacles à l'apprentissage des mathématiques qui ont une base neurologique (la dyscalculie, équivalent en maths de la dyslexie) seront également traités. Ce chapitre est pertinent pour les parents, les enseignants et les décideurs politiques qui s'intéressent à l'éducation en matière de numératie et à l'enseignement des maths, qu'il s'agisse de mieux les comprendre ou de les améliorer.

La neuroscience offre la possibilité de répondre à d'importantes questions concernant l'apprentissage des mathématiques. Elle peut par exemple chercher à savoir si les conséquences sur le cerveau de l'enseignement des mathématiques avancées justifient qu'on les enseigne à la majorité de la population. Aujourd'hui, on ne dispose pas d'éléments fiables quant à l'utilité ou l'inutilité d'enseigner le calcul intégral ou la trigonométrie à tous les élèves. Pourtant, cela constitue la norme dans les pays de l'OCDE… et au-delà. Étant donné la masse de connaissances à intégrer pour survivre aujourd'hui et les contraintes qui pèsent sur les programmes scolaires obligés d'en sélectionner une partie, il importe de se demander s'il est bon que les mathématiques avancées prennent tant de place dans les programmes[1]. La neuroscience pourra aider à répondre à cette question.

Aujourd'hui, la neuroscience s'intéresse surtout aux mathématiques de base. Ces recherches ont d'importantes implications pour l'enseignement. Au contraire des mathématiques avancées, les mathématiques de base sont d'une importance vitale pour tous les élèves, car elles permettent de vivre dans les sociétés modernes, de lire l'heure, de faire la cuisine, de gérer son budget.

Création de la numératie

La numératie, comme la littératie, est créée dans le cerveau *via* une interaction entre biologie et expérience. L'évolution a développé certaines structures cérébrales faites pour traiter le langage; de la même façon il en existe d'autres permettant une perception quantitative. Mais, toujours comme pour la littératie, les structures génétiquement prévues ne suffisent pas à gérer les mathématiques; elles travaillent en coordination avec d'autres circuits neuraux, non prévus pour la numératie mais adaptés au traitement de celle-ci par l'expérience. Des structures neurales non conçues pour la numératie sont donc modelées pour pouvoir remplir ces fonctions. C'est ce que Dehaene (1997) appelle « reconversion neuronale ». L'expérience joue certes un rôle fondamental dans la formation de ces réseaux supplémentaires, mais les contraintes biologiques sont réelles. Toutes les aires cérébrales ne peuvent pas fournir les circuits nécessaires. Certaines structures conviennent parce qu'elles sont suffisamment plastiques et propices au traitement des nombres. Les mathématiques nécessitent donc la coopération de plusieurs réseaux neuraux, des structures quantitatives biologiquement prévues et d'autres, dépendantes de l'expérience et que leurs caractéristiques biologiques permettent d'utiliser dans ce sens.

Puisque les circuits neuraux sous-tendant les mathématiques au niveau cérébral dépendent à la fois de facteurs biologiques et d'éléments liés à l'environnement, la neuroscience peut éclairer l'élaboration d'une pédagogie des mathématiques de deux grands points de vue. D'une part, comprendre les facteurs biologiques peut permettre de mieux respecter les contraintes biologiques lorsqu'on enseigne les mathématiques.

1. Il ne s'agit pas ici de remettre en cause l'enseignement des mathématiques avancées en lui-même. La question est de savoir si elles devraient être enseignées à tous les élèves, ou simplement à la minorité qui se spécialise en mathématiques ou dans des disciplines connexes.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

D'autre part, les chercheurs peuvent étudier les effets neurobiologiques de diverses méthodes d'enseignement, et préciser les voies développementales possibles. Quand on les connaîtra bien, les éducateurs pourront améliorer les méthodes éducatives et mettre au point des méthodes alternatives pour s'adapter aux différences individuelles. La neuroscience peut donc permettre l'élaboration d'une pédagogie des mathématiques plus efficace et adaptable au plus grand nombre.

Des nourrissons qui calculent

On prend facilement les bébés pour des ardoises vierges, passivement offertes au monde. Longtemps on a cru que l'homme à la naissance ne disposait d'aucun sens des nombres et devait tant bien que mal découvrir le monde autour de lui. Beaucoup de théories du développement sous-estiment le sens mathématique des jeunes enfants – y compris la théorie du développement cognitif de Piaget (1952).

On s'est récemment aperçu que le cerveau des bébés disposait déjà de la notion de quantité (Ferigenson, Dehaene et Spelke, 2004; Wynn, 1998). Deux systèmes fondamentaux leur permettent de gérer la quantité (Xu, 2003) : le premier traite les concepts de « un », « deux » et « trois ». Les bébés sont capables de distinguer ces trois quantités les unes des autres de manière précise et efficace. Le concept qu'ils ont de ces trois quantités semble fonctionner dans l'abstraction et dépasser la modalité : ils connaissent « l'idée de deux » qu'ont en commun deux sons et deux objets (Starkey, Spelke et Gelman, 1990). Le second système est plus approximatif. Il permet aux bébés de distinguer deux nombres plus élevés à condition qu'ils soient suffisamment différents. Ils font la différence entre huit et seize, par exemple, mais pas entre huit et neuf.

De plus, les enfants peuvent effectuer des opérations mathématiques avec ces nombres. Si, derrière un rideau, on place un objet, puis un autre, les enfants s'attendent à voir deux objets quand le rideau est ôté. Cela suggère qu'ils savent que « un plus un » devrait faire « deux » (Wynn, 1992). Ils sont aussi capables de faire des calculs approximatifs, par exemple estimer que « cinq plus cinq » devrait faire « à peu près dix » (McCrink et Wynn, 2004).

Ces études vont donc à l'encontre de l'idée naïve selon laquelle les enfants sont des ardoises vierges, et suggèrent qu'ils sont capables d'organiser le monde d'un point de vue quantitatif. L'évolution semble avoir fourni aux bébés un sens des nombres qui leur permet d'utiliser leurs perceptions pour interpréter le monde *via* les nombres. On peut donc dire qu'à la naissance, on est naturellement porté à utiliser les nombres pour comprendre le monde, et que cette compréhension sert de base au développement durant la petite enfance.

Les jeunes enfants disposent donc d'une base mathématique solide avant toute éducation formelle. Une grande partie de la pédagogie des mathématiques d'aujourd'hui repose sur des théories dépassées qui sous-estiment les jeunes enfants. Négliger les bases dont ils disposent, c'est se priver de fondations très utiles pour enseigner les maths. Ces fondations peuvent servir à faciliter la compréhension de concepts mathématiques formels. Qui plus est, établir la correspondance entre mathématiques symboliques et concepts du monde concret aidera à relier savoir procédural et savoir conceptuel, ce qui est indispensable en mathématiques (Seigler, 2003). Cela signifie donc que l'enseignement des maths devrait se fonder sur la compréhension numérique informelle et intuitive des enfants.

La numératie au niveau cérébral

La recherche a commencé à explorer les circuits neuraux qui sous-tendent la numératie. Le sens quantitatif des enfants, dû à la génétique, semble avoir sa source dans le lobe pariétal. Les mathématiques se construisent « autour » de structures quantitatives d'origine génétique, d'une façon à peu près analogue à la construction de la littératie à partir des structures langagières. L'éducation rend les capacités mathématiques beaucoup plus sophistiquées, mais les mécanismes de traitement numérique sous-jacents semblent rester les mêmes, car on observe de nettes similarités dans la cognition numérique au cours de la vie. Par exemple, bébés, enfants et adultes gèrent de la même façon la différentiation des nombres (Cantlon et autres, 2006). De plus, une récente étude par IRMf a montré que c'est dans le sillon intrapariétal que les enfants non encore scolarisés, comme les adultes, gèrent le traitement numéral non symbolique (Cantlon et autres, 2006). Les pratiques culturelles, linguistiques et numériques (symboliques) introduites lors de l'éducation formelle modifient donc le réseau cérébral dédié à la numératie, mais le sillon intrapariétal reste peut-être le cœur des réseaux mathématiques à l'âge adulte.

Le cortex pariétal joue un rôle fondamental dans plusieurs opérations mathématiques (Dehaene, 1997). Si cette zone est endommagée, les capacités mathématiques sont grandement perturbées. Par exemple, les patients ne peuvent plus répondre à une question aussi simple que « quel est le nombre qui se trouve entre 3 et 5 ? », mais n'ont aucune difficulté à effectuer des tâches similaires dans d'autres domaines – identifier le mois de l'année situé entre juin et août, ou la note entre do et mi. Ils sont même capables de trouver la solution à des problèmes concrets qu'ils ne peuvent plus résoudre dans l'abstrait. Ils savent que deux heures séparent 9 heures du matin de 11 heures du matin, mais n'arrivent pas à soustraire 9 de 11 dans le domaine du symbole.

Cet ensemble de résultats illustre deux principes. D'abord, les mathématiques sont dissociables d'autres domaines cognitifs. Ensuite, les compétences mathématiques sont dissociables les unes des autres. Le premier principe soutient la notion de l'existence de plusieurs intelligences partiellement distinctes ou, tout du moins, indique qu'être performant ou limité dans certains domaines n'implique pas nécessairement qu'on soit performant ou limité dans d'autres domaines. Ainsi, un enfant peut avoir un faible niveau en lecture mais être très fort en calcul. Il est donc important que les enseignants proposent aux élèves plusieurs façons d'accéder au savoir mathématique, c'est-à-dire plusieurs types de représentation et d'évaluation. Sans cette flexibilité, les difficultés que peut connaître un enfant dans d'autres domaines risquent d'interférer avec son apprentissage des mathématiques. Par exemple, un enfant dyslexique aura du mal à progresser en mathématiques en se servant d'un manuel, et un contrôle écrit ne lui permettra pas de montrer ce qu'il sait. De tels obstacles sont inutiles et masquent les capacités mathématiques. Si les élèves avaient accès à d'autres types de représentation et d'évaluation – textes électroniques et synthétiseurs vocaux – les jeunes dyslexiques n'accumuleraient pas de retard en maths, même s'ils peinent à développer leurs compétences en lecture. Cela montre bien qu'il est important de proposer différentes voies d'accès au savoir mathématique, et donc que :

L'enseignement des mathématiques devrait se faire grâce à des moyens de représentation et d'évaluation variés.

De plus, les compétences mathématiques ne sont pas indissociables. Les enseignants ne doivent donc pas partir du principe que des difficultés ou des facilités dans un domaine

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

mathématique impliquent difficultés ou facilités pour l'ensemble des mathématiques. On peut avoir un bon niveau dans une des composantes des mathématiques sans être aussi bon dans une autre, ce qui met en doute la validité des critères utilisés pour créer des groupes de niveau. L'évolution prévue par les programmes pour l'apprentissage des mathématiques ne tient pas compte des distinctions entre les différentes compétences au niveau cérébral, ce qui veut dire qu'un enfant capable d'exceller dans un domaine considéré comme « avancé » peut avoir du mal à maîtriser une compétence dite « élémentaire ». En conséquence, un tel enfant pourrait être placé dans un groupe faible, ce qui l'empêcherait de développer son potentiel. À l'avenir, la recherche en neuroscience pourrait permettre d'établir une carte des diverses compétences mathématiques. D'ici là :

La validité des critères d'évaluation est incertaine.

Les capacités mathématiques étant régies par diverses zones cérébrales, effectuer des opérations simples nécessite la collaboration de nombreuses structures. La simple représentation d'un nombre implique un circuit complexe. Le modèle à triple code décrit trois niveaux de traitement numérique : représentation de magnitude, visuelle et verbale (Dehaene et Cohen, 1995). La représentation de magnitude ou sens abstrait des quantités (« l'idée de trois ») dépend du circuit pariétal inférieur. La représentation visuelle dépend du cortex occipito-temporal inférieur. La représentation numérique (« 3 ») active cette aire dans les deux hémisphères, tandis que la représentation linguistique (« trois ») ne l'active que dans l'hémisphère gauche. La représentation verbale, enfin, met en jeu les aires périsylviennes de l'hémisphère gauche. La simple représentation d'un nombre recrute donc plusieurs aires cérébrales distinctes, y compris le cortex pariétal inférieur, crucial en matière de numératie.

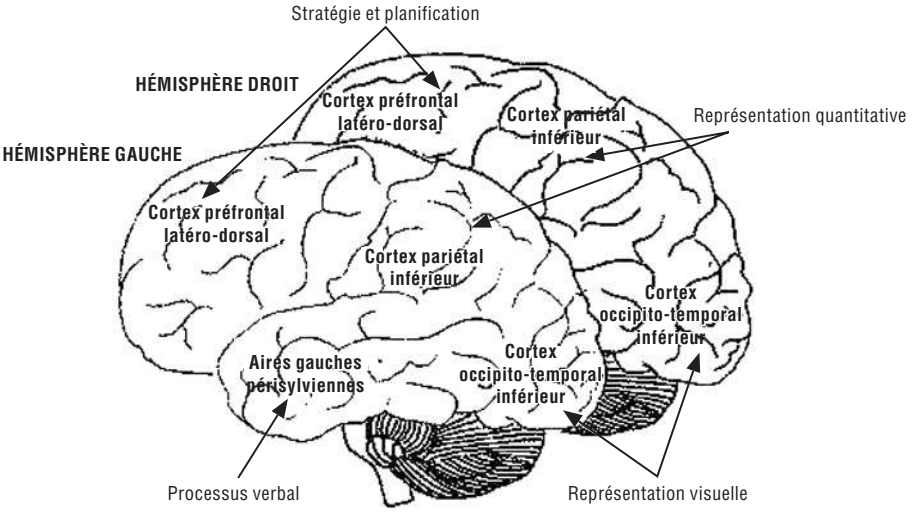
Le calcul nécessite lui aussi un réseau complexe (Dehaene, 1997). La soustraction dépend du circuit pariétal inférieur, mais l'addition et la multiplication font appel à des réseaux différents, y compris une boucle cortico-sous-corticale au niveau du ganglion de la base dans l'hémisphère droit. Actuellement la neuroscience sait peu de choses sur les mathématiques avancées, mais il semble certain que des opérations complexes activent des circuits au moins partiellement distincts. Les résultats obtenus indiquent que les réseaux dédiés à l'algèbre sont largement indépendants de ceux qui s'occupent du calcul mental (Hittmair-Delazer, Sailer et Benke, 1995). Qui plus est, des réseaux supplémentaires assurent la coordination globale (cortex préfrontal et cortex cingulaire antérieur entre autres). Le graphique 5.1 montre les aires cérébrales en jeu dans le traitement des nombres.

On ne connaît pas encore parfaitement les circuits neuraux impliqués dans le traitement mathématique, mais il est certain qu'ils font appel à des zones très dispersées. Même pour multiplier deux chiffres entre eux, on fait appel à des millions de neurones appartenant à de nombreuses aires cérébrales distinctes. Les élèves doivent apprendre à coordonner les activités de zones distinctes, qui gèrent différentes opérations, ce qui suggère que :

L'un des rôles de l'enseignement des mathématiques est d'apporter cohérence et fluidité au savoir relatif aux nombres.

Les mathématiques sont effectivement une propriété résultante de réseaux distincts et partiellement dissociables, dont la synergie est construite par l'expérience.

Graphique 5.1. **Aires cérébrales**



Source : Dehaene, S. et L. Cohen (1995), *Mathematical Cognition*, vol. 1.

Nombres et espace

Le circuit pariétal est fondamental pour la numératie, et il est également impliqué dans la représentation spatiale. Ces deux fonctions semblent étroitement liées (Dehaene, 1997). Ainsi, beaucoup de patients atteints de dyscalculie ont aussi des troubles d'ordre spatial : distinguer la droite de la gauche, par exemple (Mayer et autres, 1999). De plus, les jeunes enfants placent les nombres dans l'espace avant même que l'école leur fasse découvrir la droite graduée (« *number line* »). La tendance à associer nombres et espace semble biologique ; les méthodes pédagogiques comparant le monde des nombres à un lieu physique sont donc des représentations formelles d'un concept intuitif, et permettent de modéliser concrètement des concepts abstraits. Utiliser en classe la droite graduée et des objets concrets (cubes, bûchettes, jeux de plateau, instruments de mesure, etc.) peut donc renforcer la compréhension mathématique intuitive des enfants. Le lien fort qui existe au niveau cérébral entre nombres et espace suggère que :

Les méthodes pédagogiques qui lient nombres et espace sont efficaces.

La recherche le confirme, d'ailleurs. Un programme dirigé par Griffin, Case et Siegler (1994), centré sur l'association entre nombres et espace, a très bien réussi. Il exploitait la droite graduée ainsi que divers objets à manipuler. Quarante séquences de vingt minutes ont permis à des enfants en difficulté de rejoindre les meilleurs élèves de leur classe.

Le rôle de l'instruction

Comme le démontre le programme de Griffin, Case et Siegler (1994), l'instruction peut énormément influencer les compétences mathématiques. Les progrès réalisés par les élèves reflètent probablement des modifications neurales, car des recherches récentes montrent qu'acquérir de nouvelles connaissances mathématiques peut modifier très nettement l'activation cérébrale (Delazer et autres, 2003 ; Delazer et autres, 2004). Ces modifications semblent dépendre à la fois du contenu enseigné et de la méthode utilisée.

L'apprentissage de chaque opération mathématique entraîne des modifications particulières de l'activation cérébrale. Ischebeck et autres (2006) ont étudié les

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

modifications dues à l'apprentissage de la multiplication et de la soustraction. Dans les deux cas, l'apprentissage diminue l'activité observée dans les aires frontales inférieures, ce qui indique une baisse de l'activation des fonctions généralistes comme la mémoire de travail et le contrôle exécutif. Mais avec la multiplication, au contraire de la soustraction, l'activation est transférée du sillon intrapariétal au gyrus angulaire gauche, ce qui indique que le traitement quantitatif se voit remplacé par un système plus automatique. L'habitude de faire des soustractions rend donc plus rapide et plus efficace, alors que celle de faire des multiplications débouche sur la création de stratégies nouvelles. Puisque la pédagogie était la même dans les deux cas, ces résultats montrent que les effets neurobiologiques de l'apprentissage des mathématiques dépendent en partie du contenu enseigné.

Cela dit, les méthodes d'enseignement jouent aussi un rôle. Delazer et autres (2005) ont découvert que l'apprentissage par répétition (apprendre par cœur à associer un résultat aux deux facteurs qu'on multiplie) n'était pas encodé dans les mêmes circuits neuraux que l'apprentissage par stratégie (appliquer une série d'opérations arithmétiques pour arriver au résultat). Après l'apprentissage par répétition, l'opération active plus intensément les régions pariétales médianes jusqu'au gyrus angulaire gauche, alors qu'après l'apprentissage par stratégie, c'est le précunéus qui est activé. Cela montre que des méthodes différentes peuvent déboucher sur la création de voies neurales différentes pour un même savoir mathématique. Ainsi, deux enfants peuvent tous deux répondre que 10 plus 10 font 20, mais si l'un l'a mémorisé alors que l'autre applique la méthode de l'addition de nombres à deux chiffres, les circuits neuraux qu'ils utilisent sont différents.

Les implications de ces découvertes sont très importantes pour la façon dont on évalue les élèves. Puisque le processus par lequel le savoir est encodé influence le substrat neural, des évaluations binaires (exact/faux) ne permettent pas de tester l'apprentissage, puisqu'elles ne permettent pas de distinguer un fait appris par cœur d'un fait appris suite à l'emploi d'une stratégie. Pour s'assurer qu'un élément a été compris, il faut utiliser des méthodes d'évaluation plus fines. Stevenson et Stigler (1992) décrivent une façon d'évaluer le niveau en mathématiques qui permet de mieux déterminer les processus mis en œuvre. Cette méthode, couramment utilisée en Asie, comprend des évaluations régulières qui mettent bien en évidence le processus d'apprentissage, et s'intéressent à l'élaboration des apprentissages plutôt qu'à l'identification de réponses exactes ou fausses. D'ailleurs, les erreurs sont mises à profit pour identifier les points faibles de l'apprentissage et améliorer la compréhension. Ce type d'évaluation permettrait certainement de distinguer les connaissances acquises par répétition de celles acquises par stratégie, ce qui suggère que :

Les évaluations qui s'intéressent au processus d'apprentissage peuvent donner une représentation du savoir plus précise que celles qui aboutissent à des mesures binaires correct/faux.

Delazer et autres (2005) ont montré que l'apprentissage par stratégie débouchait sur une plus grande efficacité et une meilleure transférabilité que l'apprentissage par répétition. L'encodage neural créé par la répétition semble donc moins efficace que celui créé par l'apprentissage par stratégie. Il faudra poursuivre les études afin de confronter cette conclusion à divers types de problèmes, mais ce résultat suggère que :

L'encodage neural de l'information mathématique est sans doute plus solide après un enseignement par stratégie qu'après un apprentissage par répétition.

Ces découvertes indiquent nettement que différentes méthodes éducatives entraînent la création de circuits neuraux diversement efficaces, ce qui souligne l'importance de l'instruction. La recherche va devoir étudier l'impact neurobiologique des différentes

méthodes. Il sera également nécessaire d'évaluer les effets de chaque méthode sur différents groupes de population, car les différences individuelles jouent souvent un rôle capital.

Sexe et mathématiques

Le sexe est l'une des sources de différences individuelles en mathématiques. On observe des différences nettes entre hommes et femmes dans certaines tâches spatiales. Par exemple, les hommes ont tendance à mieux réussir que les femmes aux tests de rotation mentale. Il est possible que ce soit dû à des causes biologiques, car l'écart est important (entre 0.6 et 1.0), notable dès l'enfance, et ne diminue pas avec le temps historique (Newcombe, Mathason et Terlecki, 2002). Mais montrer que la performance dépend de facteurs biologiques n'élimine pas les facteurs liés à l'expérience, qui ont eux aussi des conséquences. En effet, l'entraînement peut nettement améliorer les capacités de rotation mentale chez les hommes et chez les femmes, et la différence entre les genres tend alors à diminuer de façon asymptotique (Newcombe, Mathason et Terlecki, 2002). D'ailleurs, toutes les différences entre les sexes répertoriées par la science semblent diminuer avec l'entraînement (Newcombe, Mathason et Terlecki, 2002). Il serait donc utile, au lieu de catégoriser les capacités en les associant aux « genres », d'établir des méthodes didactiques qui permettent à tout un chacun de développer suffisamment ses capacités spatiales.

Il est faux de croire que les hommes ont de meilleures capacités mathématiques globales que les femmes. Les résultats dépendent du contexte : les hommes réussissent en moyenne mieux aux examens standardisés, et les femmes aux épreuves scolaires (De Lisi et McGillicuddy-De Lisi, 2002). Cette différence est sans doute due aux stratégies utilisées. Les femmes ont tendance à utiliser des méthodes algorithmiques, alors que les hommes s'éloignent plus facilement des méthodes enseignées et tentent des approches originales (De Lisi et McGillicuddy-De Lisi, 2002). Les hommes réussissent donc mieux aux tests standardisés, dans lesquels beaucoup de questions nécessitent de faire appel à des solutions non algorithmiques, alors que les femmes brillent lors des épreuves scolaires, pour lesquelles il faut souvent utiliser les méthodes enseignées par le professeur. De telles différences montrent à quel point il est important de développer diverses voies d'accès au savoir mathématique afin de prendre en compte les différences individuelles.

Entraves à l'apprentissage mathématique

Certains enfants ont des difficultés en mathématiques alors que leur formation est suffisante : cela peut être dû à une dyscalculie, l'équivalent mathématique de la dyslexie. La dyscalculie est un trouble de la perception des nombres, de la compréhension des quantités numériques et de leurs rapports (Landerl, Bevan et Butterworth, 2004). Les scientifiques commencent seulement à étudier les fondements neuraux de la dyscalculie. Récemment, des études de neuroimagerie ont révélé des particularités anatomiques et fonctionnelles du sillon intrapariétal chez certains sous-groupes d'enfants dyscalculiques. Ainsi, Isaacs et autres (2001) ont comparé la densité de substance grise chez deux groupes d'adolescents nés avec le même degré de prématurité, le premier dyscalculique, le second non. Au niveau cérébral, les adolescents dyscalculiques avaient moins de substance grise dans la région intrapariétale à l'endroit précis où l'activation se produit chez les autres sujets durant une tâche arithmétique. La recherche doit continuer à étudier les fondations neurales de la dyscalculie. Néanmoins, la découverte de caractéristiques neurales atypiques associées à certains troubles mathématiques précis renforce l'idée que les

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

mathématiques n'émergent pas uniquement d'un processus culturel : certaines structures cérébrales, qui assurent les fondements conceptuels de l'apprentissage, doivent de plus être intactes et fonctionnelles.

On peut sans doute développer les circuits neuraux responsables de la dyscalculie *via* des interventions ciblées, car les réseaux mathématiques semblent être plastiques. Comme on l'a vu plus haut, apprendre de nouveaux faits mathématiques ou de nouvelles stratégies peut modifier l'activation cérébrale (Delazer et autres, 2003; Delazer et autres, 2004). On peut même rééduquer les patients atteints de lésions cérébrales responsables de troubles mathématiques. Beaucoup de patients ont récupéré des compétences mathématiques considérables grâce à des protocoles thérapeutiques ciblant leur déficit (Girelli et autres, 1996). De tels résultats suggèrent qu'il est possible de remédier à la dyscalculie. La recherche doit continuer à en étudier les fondements neuraux et mettre au point des interventions ciblées analogues à celles développées pour la dyslexie.

En mathématiques, les émotions sont une autre source fréquente de difficultés. Cette discipline effraie beaucoup de gens, au point qu'on parle « d'anxiété mathématique » (Ashcraft, 2002). On sait que cela peut bouleverser les stratégies cognitives et la mémoire de travail (Ashcraft et Kirk, 2001). L'anxiété mathématique est un problème important pour l'enseignement des mathématiques, et il serait bon que les scientifiques cherchent à identifier des méthodes permettant d'y remédier[2].

Conclusions

La neuroscience des mathématiques n'en est qu'à ses balbutiements, mais le domaine a beaucoup progressé ces dix dernières années. Les scientifiques ont commencé à mettre au jour des influences biologiques pertinentes – comme l'association entre nombres et espace – et leurs travaux peuvent être nourris par les progrès rapides de la génétique. De plus, les chercheurs commencent seulement à étudier les effets que l'apprentissage des mathématiques a sur le cerveau. Ce sujet doit être étudié d'un point de vue dynamique et développemental, afin que les multiples voies possibles soient définies. Comme dans le cas de la littératie, comprendre les voies de développement qui permettent l'accès aux mathématiques d'un point de vue biologique va permettre de mettre au point des modèles pédagogiques différenciés et adaptés aux divers types d'apprenants.

À l'heure actuelle, la neuroscience concentre l'essentiel de ses efforts sur les mathématiques de base, produisant d'importantes implications pour l'enseignement. Contrairement aux mathématiques avancées, ces opérations de base sont indubitablement vitales à tout individu pour fonctionner dans nos sociétés, ne serait-ce que pour assurer des activités aussi pratiques que lire l'heure, faire la cuisine ou gérer son budget.

De plus, à mesure que les effets des mathématiques sur le cerveau seront mieux compris, les chercheurs pourront commencer à étudier la question de savoir quelles parties des mathématiques devraient être enseignées à tous. Si par exemple on parvient à établir que l'apprentissage des mathématiques avancées modèle le cerveau de manière à lui donner accès à des modes de pensée utiles, il serait effectivement judicieux d'intégrer

2. Comme Butterworth l'a montré, la dyscalculie peut de plus produire un effet de dominos. Les enseignants, les autres élèves, les parents peuvent en venir à cataloguer l'enfant dyscalculique comme « stupide » pour la seule raison qu'il connaît des difficultés en maths. Pire, l'individu lui-même en vient à se considérer comme tel. Une telle étiquette est désastreuse pour qui que ce soit en termes de performances académiques, de par l'influence dévastatrice qu'elle a sur l'estime de soi.

les mathématiques avancées au programme général. Si, en revanche, cet apprentissage ne permet que d'acquérir des compétences mathématiques complexes, les ministères compétents pourraient choisir de ne les enseigner qu'à une partie de leur population (ceux qui en auront « besoin » par la suite). La recherche en neuroscience pourrait donc non seulement donner des pistes quant aux meilleures façons d'enseigner les mathématiques à l'école primaire, mais aussi grandement modifier le rôle de cette discipline dans l'enseignement secondaire.

Références

Ashcraft, M.H. (2002), « Math Anxiety: Personal, Educational, and Cognitive Consequences », *Current Directions in Psychological Science*, vol. 11, pp. 181-185.

Ashcraft, M.H. et E.P. Kirk (2001), « The Relationships among Working Memory, Math Anxiety, and Performance », *J Exp Psychol Gen,* vol. 11, pp. 224-237.

Cantlon, J., E. Brannon, E. Carter et K. Pelphrey (2006), « Functional Imaging of Numerical Processing in Adults and 4-y-old Children », *PLoS Biology,* vol. 4, n° 5, pp. 844-845.

Dehaene, S. (1997), *The Number Sense,* Oxford University Press, NY.

Dehaene, S. et L. Cohen (1995), *Mathematical Cognition*, vol. 1, pp. 83-120.

Delazer, M., F. Domahs, L. Bartha, C. Brennis, A. Lochy, T. Trieb et autres (2003), « Learning Complex Arithmetic – An FMRI Study », *Brain Res Cogn Brain Res*, vol. 18, n° 1, pp. 76-88.

Delazer, M., F. Domahs, L. Bartha, C. Brennis, A. Lochy, T. Trieb et autres (2004), « The Acquisition of Arithmetric Knowledge – An FMRI Study », *Cortex*, vol. 40, n° 1, pp. 166-167.

Delazer, M., A. Ischebeck, F. Domahs, L. Zamarian, F. Koppelstaetter, C.M. Siedentopf, L. Kaufmann, T. Benke et S. Felber (2005), « Learning by Strategies and Learning by Drill – Evidence from an fMRI Study », *Neuroimage*, vol. 25, pp. 838-849.

Ferigenson, L., S. Dehaene et E. Spelke (2004), « Core Systems of Number », *Trends in Cognitive Neuroscience*, vol. 8, n° 7, pp. 1-8.

Girelli, L., M. Delazer, C. Semenza et G. Denes (1996), « The Representation of Arithmetical Facts: Evidence from Two Rehabilitation Studies », *Cortex,* vol. 32, n° 1, pp. 49-66.

Griffin, S.A., R. Case et R.S. Siegler (1994), « Rightstart: Providing the Central Conceptual Prerequisites for First Formal Learning of Arithmetic to Students at Risk for School Failure », dans K. McGilly (éd.), *Classroom Lessons: Integrating Cognitive Theory and Classroom Practice*, MIT Press, Cambridge.

Hittmair-Delazer, M., U. Sailer et T. Benke (1995), « Impaired Arithmetic Facts but Intact Conceptual Knowledge – A Single Case Study of Dyscalculia », *Cortex*, vol. 31, pp. 139-147.

Isaacs, E.B., C.J. Edmonds, A. Lucas et D.G. Gadian (2001), « Calculation Difficulties in Children of Very Low Birthweight: A Neural Correlate », *Brain,* vol. 124, pp. 1701-1707.

Ischebeck, A., L. Zamarian, C. Siedentopf, F. Koppelsätter, T. Benke, S. Felber et M. Delzer (2006), « How Specifically do we Learn? Imaging the Learning of Multiplication and Subtraction », *NeuroImage*, vol. 30, pp. 1365-1375.

Landerl, K., A. Bevan et B. Butterworth (2004), *Developmental Dyscalculia and Basic Numerical Capacities: A Study of 8-9-Year-Old Students. Cognition*, vol. 93, n° 2, pp. 99-125.

De Lisi, R. et A. McGillicuddy-De Lisi (2002), « Sex Differences in Mathematical Abilities and Achievement », dans A. McGillicudddy-De Lisi et R. De Lisi (éd.), *Biology, Society, and Behavior: The Development of Sex Differences in Cognition,* Alex Publishing, Londres, pp. 155-181.

Mayer, E., M. Martory, A. Pegna, T. Landis, J. Delavelle et J. Annoni (1999), « A Pure Case of Gestmann Syndrome with a Subangular Lesion », *Brain*, vol. 122, pp. 1170-1120.

McCrink, K. et K. Wynn (2004), « Large-number Addition and Subtraction by 9-Month-Old Infants », *Psychol. Sci*, vol. 15, n° 11, pp. 776-781.

Newcombe, N., L. Mathason et M. Terlecki (2002), « Sex Differences in Mathematical Abilities and Achievement », dans A. McGillicudddy-De Lisi et R. De Lisi (éd.), *Biology, Society, and Behavior: The Development of Sex Differences in Cognition*, Alex Publishing, Londres, pp. 155-181.

Piaget, J. (1952), *The Child's Conception of Number*, Norton, NY.

Siegler, R.S. (2003), « Implications of Cognitive Science Research for Mathematics Education », dans J. Kilpatrick, W.B. Martin et D.E. Schifter (éd.), *A Research Companion to Principles and Standards for School Mathematics*, National Council of Teachers of Mathematics, Reston, VA, pp. 219-233.

Starkey, P., E.S. Spelke et R. Gelman (1990), « Numerical Abstraction by Human Infant », *Cognition*, vol. 36, pp. 97-127.

Stevenson, H.W. et J.W. Stigler (1992), *The Learning Gap: Why our Schools are Failing and what we can Learn from Japanese and Chinese Education*, Summit Books, New York.

Wynn, K. (1992), « Addition and Subtraction by Human Infants », *Nature*, vol. 358, pp. 749-750.

Wynn, K. (1998), « Numerical Competence in Infants », dans C. Donlan (éd.), *The Development of Mathematical Skills*, Psychology Press, East Sussex, RU, pp. 1-25.

Xu, F. (2003), « Numerosity Discrimination in Infants: Evidence for Two Systems of Representations », *Cognition*, vol. 89, n° 1, pp. 15-25.

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE I

Chapitre 6

Dissiper les neuromythes

En face de la vérité avec un grand V, on distingue trois groupes d'individus :
Ceux qui la cherchent : ce sont les moins nombreux.
Ceux qui s'en fichent : ce sont les plus heureux.
Ceux qui la possèdent : ce sont les plus dangereux.

Anonyme

Ce chapitre traite quelques-uns des dérapages qui se produisent lorsque des passerelles infondées ou mal fondées sont établies entre neuroscience et éducation. Il s'agit donc ici de décrire, pour mieux les dissiper, un certain nombre de « neuromythes » : idées fantaisistes mais néanmoins répandues, allant de la pensée de type « cerveau gauche » ou « cerveau droit » au déterminisme développemental pendant la petite enfance, en passant par les différences entre sexes ou le multilinguisme. Ce chapitre est particulièrement pertinent pour tout lecteur intéressé par les phénomènes d'apprentissage, notamment s'il souhaite éviter les pseudosolutions sans fondement scientifique.

Qu'est-ce qu'un « neuromythe »?

La science avance en tâtonnant. À partir de l'observation, une théorie est construite, que d'autres phénomènes viennent confirmer, moduler ou contredire. Une autre théorie est alors échafaudée, complémentaire ou contradictoire de la précédente, et le processus continue ainsi indéfiniment. Cette avancée cahotante de la science est la seule possible, mais elle n'est pas sans défaut : les hypothèses qui ont été infirmées laissent des traces dans les esprits. Pour peu que lesdites traces prennent une ampleur suffisante en termes de notoriété, s'enracinent alors des « mythes », croyances battues en brèche par la science mais largement répandues et relayées, par divers vecteurs, dans l'esprit du profane.

Les neurosciences ne sont bien entendu pas épargnées par le phénomène. Certaines expressions de la langue française en témoignent : la « bosse des maths », par exemple, dérive des recherches d'un anatomiste et physiologiste allemand, Franz Joseph Gall (1758-1828). En analysant des crânes de repris de justice vivants, et en disséquant les cerveaux de défunts, Gall a en son temps fondé la théorie de la phrénologie : un talent particulier produirait une excroissance cérébrale qui pousserait sur l'os et déformerait le crâne. En palpant la tête, Gall se targuait de reconnaître le criminel de l'honnête homme, le « matheux » du « littéraire ». Bien que la phrénologie ne soit plus d'actualité depuis longtemps, on sait aujourd'hui que certaines zones du cerveau sont spécialisées, plus particulièrement que d'autres associées à certaines fonctions. Mais contrairement aux régions que Gall avait cru reconnaître, il s'agit en fait de spécialités fonctionnelles (telles que la formation des images, la production de mots, la sensibilité tactile, etc.) et non de caractéristiques morales comme la bonté, ou la combativité[1]…

La science n'est certes pas seule responsable de l'émergence de tels mythes. Il n'est en effet pas toujours facile de comprendre toutes les subtilités des résultats d'une étude, non plus que ses protocoles et autres choix méthodologiques. Or l'humaine nature se contente souvent, si ce n'est se délecte, d'explications rapides, simples, univoques[2], qui fatalement conduisent à de mauvaises interprétations, à de douteuses extrapolations et au bout du compte à la genèse d'idées fausses[3].

Dans ce chapitre seront examinés un par un les principaux mythes propres aux sciences du cerveau; la part belle sera faite à ceux qui peuvent influencer les méthodes d'apprentissage. Pour chaque mythe, un survol historique permettra d'expliciter comment s'est forgée l'idée fausse, puis un point sera fait sur l'état actuel de la recherche scientifique

1. Gall avait aussi supposé l'existence de zones propres au langage et au calcul.
2. Les médias de masse, dont l'influence en matière de constitution d'opinions est décisive, usent et abusent de cette qualité, pour représenter souvent, de par l'adhérence de leur logique discursive avec ce besoin « humain, trop humain », un paroxysme dans le domaine de la simplification abusive (à ce sujet, voir Bourdieu, *Sur la télévision*, Paris, 1996).
3. Les scientifiques ne sont aucunement immunisés contre cette tendance. On peut certes attendre d'eux qu'ils soient rigoureux dans leur domaine (même si tel n'est pas toujours le cas), mais, pour les sujets éloignés de leurs travaux de recherche, ils sont soumis, comme tout être humain, aux influences subjectives et émotionnelles.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

sur le sujet. Paradoxalement, certains mythes ont été bénéfiques à l'éducation, car ils lui ont permis de se diversifier. Mais la plupart peuvent entraîner des conséquences fâcheuses et doivent donc, à ce titre et à d'autres, être combattus.

« Il n'y a pas de temps à perdre car pour le cerveau tout se joue avant l'âge de trois ans »

Si, sur votre ordinateur, vous entrez dans un moteur de recherche les mots-clés « Birth to three » (de la naissance à trois ans), vous trouverez un nombre impressionnant de sites anglo-saxons – les sites francophones dédiés à ce thème sont plus rares – vous expliquant que les trois premières années de votre enfant sont primordiales pour son développement futur et que, pratiquement, « tout se joue » à cet âge. Vous trouverez aussi de nombreux produits commerciaux prêts à stimuler l'intelligence de votre tout jeune enfant, avant qu'il n'atteigne ce fameux âge « fatidique » de trois ans.

Quelques phénomènes physiologiques intervenant lors du développement cérébral peuvent en effet faire croire que les étapes décisives de l'apprentissage se produisent entre la naissance et la troisième année. Ce mythe est surexploité par certains décideurs, éducateurs, fabricants de jouets, et parents, qui abreuvent leurs enfants de gymnastique pour nouveau-nés et de musiques stimulantes enregistrées sur magnétophones ou lecteurs de CD accrochés au-dessus du lit des bébés. Quels sont les phénomènes physiologiques découverts par la recherche qui pourraient être à l'origine d'une telle croyance?

Le composant fondamental du traitement de l'information dans le cerveau est la cellule nerveuse, appelée neurone. Un cerveau humain contient environ 100 milliards de neurones. Chacun peut être connecté avec des milliers d'autres, ce qui permet aux informations nerveuses de circuler massivement et dans plusieurs directions à la fois. À travers les connexions entre les neurones (synapses), les impulsions nerveuses voyagent de cellule en cellule et servent de support au développement des compétences et à la capacité d'apprentissage. L'apprentissage est donc le fait de la création de nouvelles synapses, ou du renforcement ou de l'affaiblissement de synapses existantes. Comparé à celui d'un adulte, le nombre de synapses chez le nouveau-né est faible. Après deux mois de croissance la densité synaptique du cerveau augmente de façon exponentielle et dépasse celle d'un adulte (avec un pic à l'âge de dix mois). Puis on assiste à un déclin régulier jusqu'à l'âge de dix ans, lorsque le « nombre adulte » de synapses est atteint. Une relative stabilisation se produit alors. Le processus par lequel des synapses sont produites en grand nombre est appelé synaptogenèse. Le processus de déclin est nommé élagage. Il s'agit d'un mécanisme naturel, nécessaire à la croissance et au développement.

La science a longtemps cru que le nombre maximal de neurones était fixé à la naissance et que, contrairement à la majorité des autres cellules, les neurones ne se régénéraient pas. Ainsi, chaque individu semblait perdre régulièrement des neurones. De même, à la suite d'une lésion cérébrale, les cellules nerveuses détruites ne semblaient pas remplacées. Cependant, depuis une vingtaine d'années, des études viennent nuancer ces positions en montrant deux phénomènes jusque là insoupçonnés : non seulement de nouveaux neurones apparaissent à tout moment de la vie (neurogenèse), mais de plus, dans certains cas du moins, le nombre de neurones ne fluctue pas au cours de la vie.

Quoi qu'il en soit, la synaptogenèse est intense dans les premières années de la vie d'un être humain. Et comme l'apprentissage semble être lié à la création de nouvelles synapses (intuitivement, l'idée est séduisante), il n'y a qu'un pas pour déduire l'idée selon

laquelle les premières années de l'enfant sont celles où il est le plus apte à apprendre. Ou, autre version plus courante en Europe : le très jeune enfant doit être stimulé en permanence à son plus jeune âge (les deux ou trois premières années), de façon que ses capacités d'apprentissage s'en trouvent par la suite renforcées. De telles assertions dépassent largement ce qu'il est sérieusement possible d'affirmer aujourd'hui avec quelque base scientifique.

Une expérience menée voici vingt ans a pu entretenir un tel mythe. Des études effectuées en laboratoire sur des rongeurs ont en effet montré que la densité synaptique pouvait augmenter lorsque les sujets étaient placés dans un environnement complexe, défini dans ce cas comme une cage peuplée d'autres rongeurs et de divers objets à explorer. Lorsque, plus tard, les mêmes rats ont été soumis à un test d'apprentissage de labyrinthe, il a été démontré qu'ils passaient cette épreuve avec plus de succès (et plus rapidement) que d'autres rats appartenant à un groupe de contrôle et vivant dans des environnements « pauvres » ou « isolés » (Diamond, 2001). On en a conclu que les rats vivant dans un environnement « enrichi » avaient vu leur densité synaptique augmenter, et étaient par conséquent mieux à même d'effectuer la tâche d'apprentissage.

Tous les éléments sont alors réunis pour créer un mythe : une belle expérience, assez facile à comprendre (même si la réalisation est délicate), des résultats qui vont dans le sens attendu (à milieu stimulant, bon apprentissage)… Mais il s'agit ici de conditions de laboratoire, loin des conditions réelles (existe-t-il des rats dans la nature vivant dans un environnement pauvre[4] ?). De plus, l'expérience est menée sur des rongeurs. Des non-spécialistes ont détourné les données expérimentales sur les rats, obtenues avec une rigueur scientifique incontestable, et les ont mélangées avec des idées courantes sur le développement humain pour en conclure qu'une intervention éducative, pour être plus efficace, devrait être effectuée en fonction de la synaptogenèse. Ou que, durant la petite enfance, des « environnements enrichis » sauvent des synapses de l'élagage, voire créent de nouvelles synapses, contribuant par conséquent à un accroissement de l'intelligence, ou en tout cas à une capacité d'apprendre plus élevée. C'est là attribuer à des faits établis par des travaux pertinents une signification qui outrepasse les résultats présentés dans l'étude originelle.

Encore une fois, les limites à ne pas dépasser sont assez claires : il n'existe guère, pour les humains, de données neuroscientifiques concluantes sur la relation prédictive entre la densité synaptique du premier âge et l'amélioration de la capacité d'apprentissage; de même, peu de données sont disponibles sur la relation prédictive entre la densité synaptique chez l'enfant et la densité synaptique chez l'adulte; il n'est aucune preuve

4. Dans la nature, les rats vivent dans des environnements stimulants (docks, canalisations, etc.) et on peut donc supposer qu'ils ont le nombre exact de synapses nécessaire à leur survie. Si on les place dans un environnement artificiellement appauvri, leur cerveau aura exactement la densité synaptique appropriée audit environnement. En d'autres termes, ils seront aussi « malins » qu'ils ont besoin de l'être pour survivre dans une cage de laboratoire. En admettant que le même raisonnement s'applique aux êtres humains (ce qui reste à prouver), la plupart d'entre eux étant élevés dans des environnements normalement stimulants, leur cerveau est précisément ajusté à leur environnement particulier. La plupart des enfants grandissent naturellement dans des environnements stimulants. Des recherches ont par ailleurs montré que même des enfants grandissant dans un environnement qu'on qualifierait traditionnellement d'appauvri (un ghetto, par exemple) pouvaient à terme avoir une scolarité excellente et poursuivre des études supérieures. Enfin, il y aurait beaucoup trop de facteurs à prendre en compte pour définir ce que devrait être un environnement « enrichi » pour la majorité des apprenants. En conséquence, de tels résultats sont en l'état actuel des connaissances inutilisables en matière éducative.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

neuroscientifique directe, chez l'animal ou chez l'humain, liant la densité synaptique chez l'adulte à une meilleure capacité d'apprentissage – ce qui ne signifie pas que la plasticité du cerveau en général, et la synaptogenèse en particulier, n'aient aucun rapport avec l'apprentissage, mais simplement que de nouvelles recherches sont nécessaires.

Pour approfondir le sujet, le lecteur pourra utilement consulter l'ouvrage de John Bruer : « Le mythe des trois premières années » (Bruer, 2000). L'auteur a été le premier à lutter contre ce mythe, qu'il a présenté comme « ancré dans nos croyances culturelles sur les enfants et sur l'enfance, jouant sur notre fascination pour la conscience et le cerveau, et dans notre besoin permanent de trouver des réponses rassurantes à des questions dérangeantes ». Bruer remonte au XVIIIe siècle pour en trouver l'origine : on croyait déjà que l'éducation d'une mère était la force la plus puissante pour tracer la vie et la destinée d'un enfant; les enfants épanouis étaient ceux qui avaient « bien » interagi avec leur famille. Dans son livre Bruer détruit un à un les mythes reposant sur les mauvaises interprétations de la synaptogenèse des premiers âges.

« Il existe des périodes "critiques" où certains enseignements/apprentissages sont indispensables »

S'il existe bien une synaptogenèse intense chez le jeune enfant, on ne connaît donc pas encore son influence sur le cerveau de l'adulte. Pourtant, il semble bien que les adultes soient moins aptes à apprendre certaines choses : pour qui commence tardivement à apprendre une langue étrangère, par exemple, la probabilité est forte de toujours conserver un « accent étranger » dans ladite langue; même chose pour l'apprentissage de la pratique d'un instrument de musique : la virtuosité d'un apprenant tardif n'égalera probablement jamais celle de l'enfant confronté au même apprentissage dès l'âge de cinq ans. Existe-t-il donc des périodes où l'on ne peut plus apprendre certaines choses ? Ou bien sont-ce seulement des âges où l'on apprend plus lentement – ou disons différemment ?

Si l'on a longtemps cru que le cerveau perdait des neurones avec l'âge, de nouvelles technologies ont remis en cause cette certitude. Terry et ses collègues ont montré que le nombre total de neurones dans chaque zone du cortex cérébral ne dépend pas de l'âge de l'individu. La dépendance vis-à-vis de l'âge est remarquable seulement lorsque l'on compte le nombre de neurones « larges ». Les cellules nerveuses rétrécissent, avec pour conséquence l'augmentation du nombre de neurones plus petits. Mais le nombre global reste inchangé. On a récemment découvert que d'autres régions du cerveau, comme l'hippocampe, génèrent de nouveaux neurones tout au long de la vie. L'hippocampe est, entre autres, impliqué dans les processus de mémoire spatiale et de navigation (Burgess et O'Keefe, 1996). D'étonnantes recherches comparant les chauffeurs de taxi londoniens aux autres citoyens suggèrent une relation forte entre la taille relative et l'activation de l'hippocampe d'une part, et une bonne capacité pour la navigation d'autre part. De façon similaire, on a remarqué un agrandissement du cortex auditif lors du développement du talent musical, ou un accroissement des zones motrices du cerveau à la suite d'un entraînement intense du mouvement des doigts. Dans ce dernier cas, les modifications de la configuration des réseaux de neurones affectés par le processus d'apprentissage ont pu être mesurées en imagerie cérébrale dès le cinquième jour, soit sur une durée extrêmement brève.

Les processus qui remodèlent le cerveau, synaptogenèse, élagage, développement et modification de neurones, sont regroupés dans un terme : la plasticité cérébrale. De nombreuses études ont montré que le cerveau restait plastique tout au long de la vie, non

seulement pour ce qui est du nombre de neurones (*cf.* ci-dessus), mais aussi pour ce qui est du nombre de synapses. Il ne faut pas perdre de vue que l'acquisition de compétences résulte de la formation et du renforcement de certaines connexions, mais aussi de l'élagage de certaines autres. Opérer une distinction entre deux types de synaptogenèse est donc nécessaire : celle qui se produit naturellement au début de la vie, et celle qui résulte de l'exposition à des environnements complexes tout au long de la vie. Les chercheurs parlent dans le premier cas d'apprentissage attendant de recevoir de l'expérience, et, dans le second cas, d'apprentissage dépendant de l'expérience. À titre d'exemple : l'apprentissage de la grammaire se fait au mieux, c'est-à-dire plus vite et plus facilement, quand on est jeune (*grosso modo*, avant l'âge de seize ans), mais la capacité à enrichir son vocabulaire s'améliore tout au long de la vie (Neville, 2000). Les processus d'apprentissage dépendant d'une « période sensible », comme l'apprentissage de la grammaire, correspondent à des phénomènes attendant de recevoir de l'expérience : pour que l'apprentissage se fasse sans difficulté excessive, une expérience pertinente doit idéalement avoir lieu durant un laps de temps donné (la période sensible). Les processus d'apprentissage ne dépendant pas d'une période sensible, telle l'acquisition d'un lexique, sont des phénomènes dits « dépendants de l'expérience »; la période durant laquelle se produit l'expérience de l'apprentissage n'est soumise ni à des contraintes d'âge ni à des contraintes de temps (voir chapitre 2).

Existe-t-il des « périodes critiques », c'est-à-dire des moments uniques en dehors desquels certains types d'apprentissage ne peuvent plus être effectués avec succès ? En d'autres termes, certaines compétences (voire certaines connaissances) ne peuvent-elles être acquises que lors d'une relativement courte « fenêtre d'opportunité » qui se fermerait à un moment précis du développement cérébral, et ce une fois pour toutes ? Ce concept de « période critique » date d'expériences relativement bien connues du grand public, menées en 1970 par l'éthologue Konrad Lorenz. Il avait observé que les oisillons, lors de l'éclosion de leur œuf, s'attachaient de façon indélébile à l'objet mobile proéminent de l'environnement. D'habitude, l'objet en question est leur mère, et Lorenz avait nommé ce phénomène d'attachement « l'empreinte ». En prenant la place de la mère, Lorenz parvenait à s'attacher des cohortes d'oisillons qui le suivaient partout. La période permettant cet attachement était très courte, juste à la sortie de l'œuf, et il était impossible de modifier l'objet d'attachement : les oisillons suivaient définitivement le substitut au lieu de leur mère. Dans un tel cas le terme de « période critique » s'impose : un événement (ou une absence d'événement) durant une période précise entraîne une situation définitivement irréversible[5].

Chez l'homme, jusqu'à présent, on n'a pas découvert de période critique; ce qui ne signifie pas qu'il n'en existe pas. On préfère parler de « périodes sensibles », laps de temps où l'apprentissage, dans tel ou tel domaine spécifique, est plus facile. La communauté scientifique admet qu'il existe des périodes sensibles, particulièrement pour l'apprentissage

5. Les résultats d'études animales doivent être maniés, dans le contexte qui nous préoccupe, avec une extrême prudence (ce que, on le sait, Lorenz et quelques autres sont loin d'avoir toujours fait…). Par analogie avec des expériences menées sur des rongeurs, une croyance s'est répandue, aux termes de laquelle fournir des environnements stimulants aux apprenants était de nature à accroître leur connectivité cérébrale, et à les rendre plus performants. On a même recommandé aux enseignants (et aux parents), s'ils voulaient des enfants brillants, de leur assurer un environnement coloré, intéressant et riche au niveau sensoriel. Argumenter en faveur du besoin d'« environnements enrichis » pour les enfants à partir d'études menées uniquement sur des rats n'est pas justifié (par exemple : écouter du Mozart, regarder des mobiles de couleurs, etc.), en particulier si l'on considère qu'aucune étude neuroscientifique parallèle n'a été conduite à ce jour quant à l'impact des environnements « complexes » ou « isolés » sur le développement du cerveau humain.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

du langage (qui en connaît plusieurs, dont un certain nombre à l'âge adulte). Des recherches complémentaires sont nécessaires avant de pouvoir déterminer si les programmes des systèmes éducatifs sont assortis à la succession des périodes sensibles. L'imagerie cérébrale pourra apporter de nouveaux éclaircissements sur les processus biologiques liés à ces périodes.

L'apprentissage des langues fournit de bons exemples en la matière. La recherche a montré qu'à la naissance, les enfants peuvent distinguer tous les sons du langage, même ceux d'une langue très éloignée de celle de leurs parents. Mais il est bien connu que, par exemple, les adultes japonais éprouvent des difficultés à distinguer la différence entre le son « r » et le son « l » en anglais ; « ra » et « la » sont perçus comme identiques, même si le tout jeune bébé japonais les distingue. La perception des sons est rapidement déterminée par l'environnement sonore de l'enfant, au cours des douze premiers mois de sa vie. À la fin de la première année, il ne perçoit plus les différences de sons auxquels il n'a pas été exposé. L'aptitude à différencier des sons étrangers diminue entre le sixième et le douzième mois. Pendant ce temps, le cerveau de l'enfant se modifie afin qu'il puisse devenir un locuteur très compétent dans sa langue maternelle. Comme l'acquisition du répertoire sonore de la langue maternelle n'est pas une acquisition de nouveaux sons, mais au contraire une « perte » des sons non-perçus (et, par la suite, non-produits), il est possible de formuler l'hypothèse selon laquelle ce processus se fait par élagages successifs de synapses. On préfère parler de « périodes sensibles » plutôt que de « périodes critiques » à propos de l'apprentissage humain, entre autres raisons parce qu'il s'agit d'une perte d'informations, et non d'un gain. Quoi qu'il en soit, il ne fait pas de doute que l'aptitude à reproduire les sons d'une langue (phonologie, accent) et la capacité à intégrer efficacement une grammaire sont optimales pendant l'enfance. Seule la faculté d'acquérir du lexique (apprentissage de nouveaux mots) semble perdurer dans les mêmes termes tout au long de la vie.

Les travaux de Piaget ont grandement influencé l'organisation des systèmes scolaires au cours du dernier tiers du XXe siècle. L'idée piagétienne de base à propos du développement est la suivante : l'enfant connaît des périodes spécifiques de développement cognitif et il n'est apte à apprendre à lire et à compter que vers 6-7 ans. Dans les systèmes scolaires des pays de l'OCDE, la lecture, l'écriture et l'arithmétique ne sont pas enseignées officiellement avant cet âge. Piaget et ses collègues ont entre autres affirmé que les enfants viennent au monde sans idée préconçue sur les nombres. Or, de récentes recherches sur le fonctionnement du cerveau ont montré que les enfants naissent avec un sens inné de la représentation des nombres (Dehaene, 1997). Il ne s'agit pas ici de remettre en cause tous les résultats de Piaget. Comme il l'avait pressenti, des périodes sensibles existent bel et bien. Mais il semble, aujourd'hui, que les enfants soient plus « doués » à la naissance que les chercheurs ne l'ont longtemps pensé (Gopnik et autres, 2005). C'est pour cette raison que les théories de Piaget doivent être relativisées à la lumière des recherches en cours, et de celles à venir.

« Mais j'ai lu quelque part que nous n'utilisons que 10 % de notre cerveau de toute façon… »

On entend souvent dire que l'homme n'utilise que 10 ou 20 % de son cerveau. D'où provient ce mythe ? Il est difficile de le dire. Certains attribuent son origine à Einstein, qui aurait répondu lors d'une interview qu'il n'utilisait que 10 % de son cerveau. Lors des premières recherches sur le cerveau, les chercheurs ont entretenu ce mythe. Dans les années 30, Karl Lashley explorait les fonctions de certaines zones cérébrales à l'aide de chocs électriques. De nombreuses zones cérébrales ne réagissant pas à ces chocs, le

chercheur en a conclu que ces régions n'avaient pas de fonction. Ainsi est apparu le terme de « cortex silencieux ». Cette thèse est maintenant jugée incorrecte.

De mauvaises interprétations du fonctionnement cérébral ont aussi entretenu ce mythe. Le cerveau est aujourd'hui, grâce aux techniques d'imagerie, précisément décrit en zones fonctionnelles. À titre d'exemple, à chaque sens correspondent une ou plusieurs zones fonctionnelles primaires : une zone visuelle primaire, qui reçoit les informations perçues par les yeux, une zone auditive primaire, qui reçoit les informations perçues par les oreilles… Par ailleurs, plusieurs régions sont liées à la production et à la compréhension du langage. Toutes ces zones sont parfois décrites séparément par les physiologistes, et le public non initié, ne retenant que ces descriptions partielles, peut avoir ainsi l'impression que le cerveau fonctionne zone par zone, et que donc, globalement, à chaque instant, seule une petite région du cerveau est active. Or, ce n'est pas ce qui se produit. Tout d'abord, les zones primaires sont entourées de zones secondaires. Par exemple, les informations provenant des images perçues par les yeux sont envoyées dans les zones visuelles primaires, puis sont ensuite analysées dans les zones visuelles secondaires, où s'accomplit la reconstitution en trois dimensions des objets perçus. Au même moment, des informations provenant de la mémoire du sujet circulent dans le cerveau pour reconnaître ces objets, tandis que des informations sémantiques en provenance des zones du langage viennent s'y adjoindre, afin que le sujet puisse rapidement nommer les objets. En outre, à tout moment, les zones cérébrales chargées de traiter les informations de posture et de mouvement sont en action sous l'effet des signaux nerveux provenant de tout le corps, permettant au sujet de savoir s'il est assis, debout, la tête tournée vers la droite, la gauche… Ainsi, une description passive des zones du cerveau peut entraîner une mauvaise interprétation du fonctionnement cérébral.

Une autre origine du mythe est à chercher dans le fait que le cerveau est constitué de dix cellules gliales pour un neurone. Les cellules gliales ont un rôle nutritif et de support des cellules nerveuses, mais ne transmettent aucune information. D'où le mythe des 10 %, puisque qu'en termes de transmission des impulsions nerveuses, seuls les neurones sont recrutés (soit 10 % des cellules composant le cerveau). Mais cette vision des fonctions cellulaires est un peu simpliste; si les cellules gliales ont un rôle différent de celui des neurones, elles n'en sont pas moins indispensables au fonctionnement de l'ensemble.

Toutes les données en neurosciences aujourd'hui montrent que le cerveau est actif à 100 %. En neurochirurgie, où il est possible d'observer des fonctions cérébrales sur des patients en anesthésie locale (le cortex ne possédant pas de récepteurs à la douleur), des stimulations électriques n'ont montré aucune zone inactive, même quand aucun mouvement, sensation ou émotion n'est observé. Aucune zone cérébrale ne doit être totalement inactive, même pendant le sommeil – et en trouver signale un sérieux trouble fonctionnel. De même, des exemples en neurologie montrent qu'une perte bien inférieure à 90 % du tissu cérébral entraîne de sérieuses conséquences sur le fonctionnement du cerveau. Aucune région cérébrale ne peut être abîmée sans provoquer de déficits physiques ou mentaux. Les exemples de gens ayant vécu pendant des années avec une balle dans le cerveau (ou avec tout autre traumatisme) n'indiquent pas l'existence de « zones inutiles ». S'il est effectivement possible, dans certains cas, de se remettre complètement d'un choc, ce n'est pas dû au fait que la lésion toucherait à une ou des « zones inutiles », mais plutôt à l'extraordinaire capacité de plasticité décrite ci-dessus : des neurones, ou des réseaux de neurones, sont capables de suppléer ceux qui sont détruits (dans de tels cas, le cerveau se reconfigure), et par conséquent de pallier les déficits qui en résultent.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Enfin, une raison physiologique vient à l'appui de la démonstration : l'évolution ne permet pas le gaspillage. Comme les autres organes, plus que tout autre sans doute, le cerveau est façonné par la sélection naturelle. Il ne représente que 2 % du poids total du corps humain, mais consomme 20 % de l'énergie disponible. Considérant ce haut coût énergétique, il semble bien improbable que l'évolution ait permis le développement d'un organe dont 90 % de la structure ne servirait à rien…

« Je suis "cerveau gauche", elle est "cerveau droit"… »

Le cerveau est formé de réseaux neuronaux. Il présente des zones fonctionnelles interagissant entre elles. De surcroît, il est constitué de deux hémisphères : un gauche et un droit. Chaque hémisphère semble plus spécialisé dans certains domaines que dans d'autres, et, ainsi, on entend souvent d'étranges énoncés, tels que : « moi, je suis plutôt cerveau gauche » ou « les femmes ont le cerveau droit plus développé »… Peut-on réellement soutenir de tels propos ? Existe-t-il vraiment un cerveau droit et un cerveau gauche ? Une rapide analyse des origines de ces termes est nécessaire pour déterminer s'ils correspondent à des réalités, ou s'il ne s'agit pas, une fois encore, de contestables extrapolations de données scientifiques.

Tout d'abord, il est important de savoir que les deux hémisphères ne sont pas des entités anatomiques et fonctionnelles séparées : des structures nerveuses les relient (le corps calleux, ou « corpus callosum ») ; de nombreux neurones ont leur noyau cellulaire dans un hémisphère et des prolongements dans l'autre. Ce simple fait suffit à s'interroger.

Le « cerveau gauche » est parfois décrit comme le siège du rationnel, de l'intellectuel, de l'analyse et de la parole. C'est également lui qui traite l'information numérique d'une façon déductive et logique. Il dissèque l'information en analysant, distinguant et structurant les parties d'un tout, en ordonnant les données de façon linéaire. L'hémisphère gauche est le mieux équipé pour s'occuper des tâches liées au langage (écriture et lecture), à l'algèbre, à la résolution de problèmes mathématiques, aux opérations logiques. On pense donc que les personnes qui utilisent préférentiellement leur « cerveau gauche » seraient rationnelles, intellectuelles, logiques, et auraient un bon sens analytique. On les voit plutôt comme mathématiciens, ingénieurs, chercheurs…

Par opposition au « cerveau gauche », spécialiste de la pensée analytique, le « cerveau droit » est présenté comme le siège de l'intuitif, de l'émotionnel, du non-verbal, du synthétique, qui permet les représentations dans l'espace, la création et les émotions. Le « cerveau droit » synthétise plutôt l'ensemble, voit la forêt mais non les arbres. C'est lui qui recrée les formes en trois dimensions, remarque les ressemblances plutôt que les différences, comprend les configurations complexes. Il agit ainsi dans la reconnaissance des visages, la perception des espaces. D'après ces caractéristiques, les personnes qui utilisent préférentiellement leur « cerveau droit » seraient intuitives, émotives, imaginatives et se repèreraient bien dans l'espace. On les voit plutôt dans les professions artistiques et créatives.

Cette opposition « cerveau gauche/cerveau droit » tire son origine des premières recherches en neurophysiologie. Les capacités intellectuelles étaient alors souvent décrites en deux classes : les aptitudes critiques et analytiques d'une part, les aptitudes créatrices et synthétiques d'autre part. Une des doctrines majeures de la neurophysiologie du XIXe siècle associait chaque classe à un hémisphère. En 1844, Arthur Ladbroke Wigan publie *A New View of Insanity: Duality of the Mind*. Dans ce livre, il décrit les deux hémisphères cérébraux comme indépendants, et attribue à chacun une volonté et une

façon de penser propres. Ils travaillent habituellement ensemble mais dans certaines maladies, ils peuvent travailler l'un contre l'autre. Une notion popularisée, entre autres, par la publication du fameux livre de Robert Louis Stevenson en 1866, *L'étrange cas du Docteur Jekyll et de Mister Hyde*, qui exploite l'idée d'un hémisphère cérébral gauche cultivé, s'opposant à un hémisphère droit émotif, primitif, qui perd facilement tout contrôle. Avec Paul Broca, neurologue français, la fiction est dépassée pour faire place à des résultats fonctionnels réels. Broca a été le premier à localiser différentes fonctions dans les deux hémisphères. Entre 1861 et 1863, il examina *post-mortem* les cerveaux de plus de 20 patients dont les fonctions du langage avaient été altérées. Dans tous les cerveaux examinés, il remarqua des lésions dans l'hémisphère gauche, dans le lobe frontal, alors que l'hémisphère droit était toujours intact. Il en conclut que la production du langage parlé devait être localisée dans la partie frontale de l'hémisphère gauche. Quelques années plus tard, Wernicke, un neurologue allemand, compléta la théorie de Broca sur le langage. Comme son collègue français, il procéda à l'examen *post-mortem* de cerveaux ayant connu des troubles du développement du langage. De ces observations, Wernicke suggéra que la capacité de comprendre le langage est située dans le lobe temporal de l'hémisphère gauche. Ainsi, Broca et Wernicke ont associé le même hémisphère cérébral, le gauche, à deux composants essentiels du traitement du langage, la compréhension et la production orale.

Jusqu'aux années 60, les observations sur la latéralisation du langage (le langage est dans l'hémisphère gauche) étaient fondées sur des études *post-mortem* de patients présentant des lésions cérébrales de localisation et de sévérité variables. Certains neurologues prétendaient que le langage n'était pas totalement latéralisé, car l'absence de lésion dans l'hémisphère droit ne signifiait pas que celui-ci ne tenait aucun rôle dans ce cadre. La présence de lésions situées uniquement du côté gauche pouvait être due au hasard. Les preuves de la pertinence de cette intuition ont été fournies par des études sur des patients à « cerveaux séparés ». Chez ces patients, le corps calleux était sectionné afin de stopper les attaques épileptiques d'un hémisphère vers l'autre. Même si le but premier de l'opération était de réduire les crises épileptiques, les chercheurs pouvaient sur ces patients étudier les fonctions de chaque hémisphère. Les premières études de ce type eurent lieu dans les années 60 et 70 (le prix Nobel de médecine Roger Sperry et ses collaborateurs du Californian Institute of Technology ont ici joué un rôle prépondérant). Sperry et son équipe ont réussi à fournir de l'information à un seul hémisphère de leurs patients à « cerveaux séparés » et demandaient, par exemple, auxdits patients d'utiliser chaque main séparément pour identifier des objets, sans regarder ceux-ci. Pour comprendre ce protocole expérimental, il faut savoir que les fonctions sensitives et motrices de base sont divisées symétriquement entre les deux hémisphères cérébraux; l'hémisphère gauche reçoit (presque) toutes les informations sensitives (et commande les mouvements) de la partie droite du corps alors que l'hémisphère droit reçoit (presque) toutes les informations sensitives (et commande les mouvements) de la partie gauche du corps. Ainsi, les informations sensitives perçues par la main droite, lorsqu'elle tâte un objet, sont reçues dans l'hémisphère gauche – et inversement. Lorsque les patients touchaient un objet avec leur main droite, ils pouvaient nommer facilement l'objet. Quand l'objet était touché par la main gauche, ils ne pouvaient le nommer (mais en reconnaissaient la fonction). La preuve que l'hémisphère gauche est le siège des principales fonctions du langage était ainsi administrée.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Cette localisation inégale des fonctions du langage lança l'idée que l'hémisphère gauche était celui du verbe, le droit celui du non-verbal. Comme le langage a souvent été perçu comme la fonction la plus noble de l'espèce humaine, l'hémisphère gauche fut déclaré « dominant ».

D'autres expériences avec le même type de patients ont permis de préciser les fonctions de l'hémisphère droit. Une vidéo de Sperry et Gazzaniga montrant le patient « W.J. » est une des plus surprenantes démonstrations de la supériorité de l'hémisphère droit pour la vision dans l'espace. Plusieurs dés avaient été donnés au patient : chacun avait deux faces rouges, deux faces blanches et deux faces avec des bandes en diagonale alternativement rouges et blanches. Le patient devait arranger les dés selon des modèles dessinés sur des cartes. Le début de la vidéo montre « W.J. » qui range rapidement les dés selon le modèle en utilisant sa main gauche (qui est commandée, rappelons-le, par l'hémisphère droit). Lorsqu'il utilise sa main droite (qui est commandée par l'hémisphère gauche), « W.J. » rencontre de grandes difficultés pour accomplir la même tâche. Il est lent et bouge les dés de façon indécise, mais dès que sa main gauche intervient, il redevient rapide et précis. Lorsque les chercheurs écartent la main gauche de « W.J. », celui-ci redevient lent et indécis. D'autres recherches conduites par Sperry et ses collègues (1969) ont également montré la prépondérance de l'hémisphère droit dans les processus de vision dans l'espace. Ce rôle a ensuite été confirmé par des études de cas cliniques. Des patients atteints de lésions dans l'hémisphère droit étaient incapables de reconnaître des visages familiers, d'autres patients avaient des difficultés d'orientation spatiale.

Certains patients ayant des lésions dans l'hémisphère droit ont présenté des déficits dans l'identification des intonations émotionnelles des mots et dans la reconnaissance des expressions émotionnelles faciales. Les études de comportement confortent les études cliniques : la prosodie est mieux perçue si les stimuli sont reçus par l'oreille gauche (dont l'information arrive à l'hémisphère droit) ; des images vues par le champ visuel gauche provoquent une plus grande réaction émotionnelle. On en a déduit que l'hémisphère droit était aussi spécialisé dans les processus liés aux émotions.

En 1970, le psychologue Robert Ornstein, dans *The Psychology of Consciousness*, lançait l'hypothèse aux termes de laquelle les « Occidentaux » utilisent principalement la moitié gauche de leur cerveau : ils ont un hémisphère gauche très entraîné, à cause de leur attention sur le langage et la pensée logique. En revanche, ils négligent leur hémisphère droit, et par ce biais, leur pensée intuitive et émotionnelle. En résumé, Ornstein associe l'hémisphère gauche à la pensée analytique et logique des « Occidentaux », et l'hémisphère droit à la pensée intuitive et émotionnelle des « Orientaux ». Ainsi, le dualisme traditionnel entre intelligence et intuition trouvait une origine physiologique fondée sur la différence des deux hémisphères cérébraux. Outre l'aspect éminemment contestable des théories d'Ornstein au plan éthique, cette conception résultait de l'accumulation de mauvaises interprétations et de distortions des résultats scientifiques précédemment évoqués.

Un autre modèle assez répandu en la matière, quoique non accepté scientifiquement, stipule que l'hémisphère gauche traite plutôt les changements rapides et analyse les détails et les caractéristiques des stimuli, alors que le droit traite les caractéristiques globales et simultanées des stimuli. Ce modèle sans fondement scientifique reste entièrement spéculatif. Ainsi, à partir des différences entre l'hémisphère verbal (le gauche) et le non-verbal (le droit), est apparu sur le marché des neuromythes un nombre sans cesse grandissant de concepts abstraits et de relations entre fonctions mentales et hémisphères, toutes ces interpolations s'éloignant de plus en plus des résultats scientifiques.

Puis, peu à peu, les deux hémisphères n'ont plus été décrits comme deux façons de penser, mais comme révélateurs de deux types de personnalité. Les concepts de « penser avec son cerveau droit » et « penser avec son cerveau gauche », liés à l'idée d'un hémisphère dominant, ont fait émerger l'idée que chaque individu dépendait de façon prédominante d'un hémisphère. On a décrit ainsi des styles cognitifs : une personne rationnelle, analytique est dite « hémisphère gauche » ou « cerveau gauche »; une personne intuitive, émotionnelle est déclarée « hémisphère droit » ou « cerveau droit ». Ces styles cognitifs, relayés entre autres par certains médias (périodiques, livres de « connaissance de soi », congrès…) sont devenus très populaires et ont soulevé de grandes questions relatives à leur application dans l'enseignement : fallait-il, selon les caractéristiques de l'apprenant en termes de latéralisation cérébrale, imaginer des méthodes d'enseignement/apprentissage qui s'adaptent au mieux à l'utilisation de l'un ou l'autre des hémisphères ? Les programmes scolaires étaient-ils bien adaptés à un enseignement qui utilise l'ensemble du cerveau ou, avec leur focalisation sur les mathématiques et le langage, étaient-ils trop centrés sur le « cerveau gauche »?

L'idée selon laquelle les sociétés occidentales se focalisent sur une moitié seulement de nos capacités mentales (« la façon de penser de notre hémisphère gauche ») et négligent l'autre moitié (« la façon de penser de notre hémisphère droit ») s'est répandue. Les systèmes éducatifs occidentaux n'étaient pas en reste. Des didacticiens renommés, tels que E.P. Torrance ou M. Hunter, ont recommandé que l'école change ses méthodes d'enseignement en fonction du concept d'hémisphère dominant. Hunter prétendait que les programmes éducatifs étaient principalement faits pour les « cerveaux gauches ». Torrance confirmait que l'école favorise les activités dépendantes du « cerveau gauche », comme le fait d'être toujours assis, d'apprendre l'algèbre… Favoriser l'hémisphère droit consisterait, en permettant aux élèves de s'allonger, d'apprendre la géométrie… Ces réflexions ont conduit à l'apparition de méthodes mettant en jeu les deux hémisphères, certaines allant jusqu'à renforcer les activités liées à l'hémisphère droit. Un exemple de ces nouvelles méthodes est « montre et dit » : au lieu de seulement lire des textes à ses élèves (action de l'hémisphère gauche), l'enseignant montre aussi des images et des graphiques (actions liées à l'hémisphère droit). D'autres méthodes utilisent la musique, des métaphores, des jeux de rôles, de la méditation, du dessin, etc., dans le but d'activer la synchronisation des deux hémisphères. Ces méthodes ont permis de faire progresser les principes éducatifs en les diversifiant. Pourtant, elles se fondent sur une mauvaise interprétation scientifique, car on ne peut séparer si nettement les deux moitiés du cerveau.

En effet, aucune preuve scientifique ne montre une corrélation entre le degré de créativité et l'activité de l'hémisphère droit. Une analyse récente de 65 études en imagerie cérébrale sur le traitement des émotions souligne qu'on ne peut pas associer cette tâche uniquement à l'hémisphère droit. De même, aucune preuve scientifique ne valide l'idée selon laquelle l'analyse et la logique dépendent de l'hémisphère gauche ni que celui-ci est le siège privilégié des mathématiques, de la lecture ou de l'écriture. À l'inverse, Stanislas Dehaene (1997) a montré que les deux hémisphères sont actifs pour identifier les chiffres arabes (exemples : 1 ou 2 ou 5). De même, d'autres données récentes établissent que, lorsque les processus de lecture sont analysés à l'échelle de composants plus fins, des sous-systèmes des deux hémisphères sont activés (par exemple : le décodage de mots écrits ou la reconnaissance de sons pour les processus de niveau plus élevé, tels que la lecture d'un texte). En fait, même une capacité associée par essence à l'hémisphère droit, l'encodage des relations spatiales, se révèle être du ressort des deux hémisphères – mais de façon différente. L'hémisphère gauche est plus

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

habile à l'encodage des relations spatiales « catégorielles » (par exemple haut/ bas ou droite/ gauche) alors que l'hémisphère droit est plus habile à l'encodage des relations spatiales métriques (c'est-à-dire ce qui concerne les distances continues). En outre, la neuroimagerie a montré que, même dans ces deux cas précis, des zones des deux hémisphères étaient activées et que ces zones travaillaient ensemble. Cas plus étonnant : des recherches ont révélé que l'hémisphère dominant pour le langage n'était pas aussi lié qu'on le pensait à la latéralité manuelle. En effet, une idée très répandue est que « les droitiers ont leur langage à gauche, les gauchers leur langage à droite ». Or, 5 % des droitiers ont les zones principales liées au langage dans l'hémisphère droit et 30 % des gauchers les ont dans l'hémisphère gauche.

Ainsi, en se fondant sur les dernières études, les scientifiques pensent que les hémisphères cérébraux ne travaillent pas isolément, mais ensemble, pour toutes les tâches cognitives, même s'il existe des asymétries fonctionnelles. Le cerveau est un système hautement intégré; il est rare que l'une de ses parties travaille de façon isolée. Il existe certaines tâches, telles que la reconnaissance d'un visage et la production d'un discours, pour lesquelles un hémisphère donné est dominant, mais la plupart des tâches nécessitent le travail des deux hémisphères en parallèle. À la lumière de ces notions, l'utilisation des concepts de « cerveau gauche » et de « cerveau droit » est abusive. Même si, comme mentionné précédemment, de tels concepts en grande partie erronés ont permis de diversifier les méthodes éducatives (bienfaits collatéraux…), tomber dans le piège de la classification des élèves ou des cultures en fonction d'un hémisphère virtuellement dominant est non seulement hautement contestable au plan scientifique, potentiellement dangereux au plan social, mais de surcroît fortement discutable (pour dire le moins) au plan éthique. Il importe donc d'éviter de telles manœuvres.

« Il faut bien reconnaître que le cerveau de l'homme est différent du cerveau de la femme »

L'étude PISA de 2003 révèle des différences d'apprentissage liées au sexe dans la majorité des pays. Par exemple, les garçons réussissent mieux en mathématiques. Ces dernières années ont vu paraître des ouvrages prétendant s'inspirer de résultats scientifiques pour montrer que les hommes et les femmes pensent différemment et que cela est dû à un développement cérébral différent – on pourrait citer *Why Men Don't Listen and Women Can't Read Maps: How We're Different and What to Do About It* de Allan Pease et Barbara Pease, 1999 (en français : *Pourquoi les hommes n'écoutent jamais rien et pourquoi les femmes ne savent pas lire les cartes routières?*). Qu'en est-il exactement des recherches actuelles ? Peut-on parler d'un « cerveau féminin » et d'un « cerveau masculin » ? Est-il souhaitable de proposer un enseignement différencié selon le sexe ?

Des recherches sur le cerveau révèlent des différences morphologiques et fonctionnelles entre les cerveaux de l'homme et de la femme : chez l'homme le cerveau est plus volumineux; lorsque le langage est en jeu, la zone propre au langage est activée plus fortement chez la femme. Mais déterminer ce que signifient de telles différences est extrêmement malaisé. Actuellement, aucune étude n'a montré de processus différents selon le sexe dans la constitution des réseaux neuronaux lors de l'apprentissage. Des recherches complémentaires sont nécessaires.

Les termes même de « cerveau féminin » et de « cerveau masculin » correspondent plus à une « façon d'être » cognitive qu'à une réalité biologique. Baron-Cohen, qui a utilisé ces expressions, pour décrire l'autisme et les troubles associés (Baron-Cohen, 2003), affirme que les hommes sont plus « méthodiques » (aptitudes à comprendre les systèmes

mécaniques) et les femmes meilleures « communicantes » (aptitudes à communiquer et à comprendre les autres). Il suggère alors que l'autisme peut être perçu comme une forme extrême du « cerveau masculin », mais ne soutient pas que les hommes et les femmes aient des cerveaux radicalement différents, ni que les femmes autistes aient un cerveau masculin; il emploie plutôt les termes « cerveaux féminin et masculin » pour désigner des profils cognitifs particuliers. Ces dénominations sont un peu malheureuses, car elles contribuent à propager des idées fausses sur le fonctionnement du cerveau.

Supposons maintenant que l'on établisse vraiment qu'en moyenne le cerveau des filles les rend moins aptes à l'apprentissage des mathématiques. Serait-ce suffisant pour proposer un enseignement différencié ? Si l'objectif de l'enseignement est de produire des êtres sur-spécialisés, alors la question pourra se poser. Mais s'il importe avant tout de former des citoyens possédant une culture de base, le débat change de nature, et une telle avancée perdrait de sa pertinence et de sa signification en termes de politique éducative. En admettant toujours que lesdites différences existent et que l'on parvienne à le prouver, il y a fort à parier qu'elles seront minimes et de plus reposeront sur des moyennes. Or, il est concevable que les variations individuelles soient telles qu'il serait impossible de savoir si une jeune fille, prise au hasard, sera moins apte à l'apprentissage qu'un jeune garçon pris au hasard…

« Le cerveau d'un jeune enfant ne peut correctement apprendre qu'une seule langue à la fois »

De nos jours, la moitié de la population mondiale parle au moins deux langues et le multilinguisme est considéré comme un atout. Pourtant, on a longtemps cru qu'apprendre plusieurs langues posait un problème, et il reste quelques traces de cette superstition dont les fondements mêmes sont pour le moins douteux. La plupart des idées fausses sur ce sujet reposent sur la représentation du langage dans le cerveau. Un premier mythe consiste à croire que plus une personne apprend une nouvelle langue, plus elle perd l'autre. Une autre fausse représentation imagine que deux langues dans le cerveau se trouvent en deux zones séparées sans points de contact. On a ainsi pensé que les connaissances acquises dans une langue ne pouvaient être transférées dans une autre. De ces idées, on a déduit que l'apprentissage simultané de deux langues durant l'enfance pouvait créer un mélange des deux langues dans le cerveau, qui ralentirait le développement de l'enfant : la langue maternelle devait être apprise « correctement » avant de commencer l'apprentissage d'une autre langue.

Ces idées fausses proviennent d'une combinaison de facteurs. Comme la langue est une entité culturelle et politique importante, il a été usé de nombreux arguments, dont des résultats de recherches sur le cerveau, pour privilégier une langue, dite officielle, au détriment d'autres. Quelques observations médicales ont aussi une part de responsabilité : certains patients, après un traumatisme cérébral, ayant totalement oublié une langue et pas du tout une autre, l'idée que les langues occupaient des zones séparées dans le cerveau s'est mécaniquement imposée. Des études au début du XXe siècle ont montré que les personnes bilingues avaient une « intelligence »[6] inférieure. Ces travaux présentaient un biais de protocole, car elles concernaient surtout des enfants de migrants connaissant des conditions sociales et culturelles difficiles, et pour la plupart sous-alimentés. Il aurait fallu

6. Le terme « intelligence » doit être employé avec mesure. Il ne connaît pas de réelle définition scientifique.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

aussi prendre en compte que ces enfants avaient commencé à apprendre la langue de leur pays d'accueil vers l'âge de 5-6 ans, voire plus tard, et que, ne la maîtrisant pas (bien), ils rencontraient des problèmes dans l'apprentissage des autres matières. Ainsi, ces études prétendaient comparer l'intelligence d'enfants monolingues provenant de familles autochtones (et socialement favorisées) à l'intelligence d'enfants multilingues issus de milieux défavorisés pour qui les connaissances familiales limitées de la langue dominante représentaient un fort handicap social.

Les études récentes ont révélé un chevauchement des zones du langage dans le cerveau des personnes qui maîtrisent plusieurs langues[7]. Ce point pourrait se voir détourné afin de confirmer le mythe selon lequel le cerveau dispose de ressources limitées (en volume) pour stocker les informations relatives au langage. Cependant, d'autres études sur des sujets bilingues ont montré l'activation de zones distinctes de quelques millimètres quand ces personnes ont décrit leurs activités du jour d'abord dans leur langue maternelle, puis dans une langue apprise plus tardivement (Kim, 1997). La question des « zones du langage » chez les personnes multilingues n'est donc pas résolue. Il est faux d'affirmer que la maîtrise de la langue maternelle est amoindrie quand une seconde langue est apprise. Les personnes expertes en plusieurs langues en sont une preuve vivante. Les élèves qui apprennent une langue étrangère à l'école ne faiblissent pas dans leur langue maternelle. Ils progressent plutôt dans les deux[8].

Les connaissances acquises dans une langue ne seraient pas accessibles (ou transférables) dans une autre : ce mythe est peut-être le plus contre-intuitif de tous. Toute personne qui apprend un concept difficile dans une langue (l'évolution, par exemple) est capable de le comprendre dans une autre langue. Une éventuelle incapacité d'expliquer le concept est certainement due à un manque de vocabulaire, plutôt qu'à une diminution de connaissances. Des expériences ont montré que plus des connaissances sont acquises dans des langues différentes, plus elles sont stockées en des zones éloignées de la zone réservée au langage : elles ne sont pas seulement préservées sous forme de mots mais aussi sous différents supports, des images par exemple. Les personnes multilingues ne se rappellent plus, souvent, dans quelle langue elles ont appris certaines choses : elles peuvent avoir oublié si elles ont lu tel article ou vu tel film en français, en allemand ou en anglais.

Le mythe selon lequel il faut bien parler la langue maternelle avant d'apprendre une seconde langue suppose que les langues doivent être apprises dans des temps séparés. Cependant, des études ont montré que les enfants qui maîtrisent deux langues comprennent mieux les structures langagières (dans les deux langues) et les appliquent de façon plus consciente. Ainsi, le multilinguisme permet d'acquérir d'autres compétences liées au langage. Ces effets positifs sont plus nets quand la deuxième langue est acquise tôt; une éducation multilingue n'entraîne pas de retard de développement. Il est vrai que, quelques fois, les très jeunes enfants font des confusions entre les langues. Mais dans la plupart des cas, ce phénomène disparaît ensuite.

7. Les conditions de la création d'un tel chevauchement sont controversées. Une théorie stipule que les zones réservées aux langues se chevauchent quand elles sont apprises à un âge jeune; lorsque la deuxième langue (ou les autres) est apprise tardivement, il n'y a pas chevauchement. Une autre théorie affirme qu'un chevauchement apparaît quand les deux langues sont maîtrisées.
8. Des études menées en 1990 sur des enfants d'immigrants turcs dans la République fédérale d'Allemagne ont montré que le nombre de fautes commises par ces enfants diminuait en turc et en allemand, à condition de suivre une scolarité régulière.

Jusqu'à présent, les théories sur le bilinguisme et le multilinguisme sont surtout fondées sur des théories cognitives. Les futurs programmes scolaires sur l'apprentissage des langues devraient s'appuyer sur des exemples de pratiques d'enseignement réussies. Des recherches supplémentaires sur le cerveau sont nécessaires pour découvrir d'éventuelles périodes favorables à l'apprentissage des langues (périodes sensibles décrites ci-dessus).

« Améliorez votre mémoire ! »

La mémoire, fonction essentielle dans l'apprentissage (peut-on apprendre sans mémoire?), est aussi le sujet privilégié de bien des fantasmes et des idées fausses. « Améliorez votre mémoire ! », « Augmentez vos capacités mémorielles ! », « Comment acquérir rapidement une mémoire exceptionnelle ! » : slogans publicitaires pour des ouvrages ou des produits pharmaceutiques. Vers les périodes d'examens scolaires et universitaires, on entend ce genre de choses avec une insistance accrue. Les connaissances actuelles permettent-elles de comprendre suffisamment les processus pour envisager la réalisation de produits ou de méthodes améliorant la mémorisation ? A-t-on besoin actuellement de la « même mémoire » qu'il y a cinquante ou cent ans, alors que les techniques ont évolué et que les métiers ont changé ? Existe-t-il différentes mémoires : visuelle, lexicale, émotionnelle ? Enfin, les méthodes d'apprentissages utilisent-elles la mémoire comme il y a cinquante ans ?

La recherche sur les processus mémoriels a progressé ces dernières années. On sait maintenant que la mémoire n'obéit pas à un seul type de phénomène et qu'elle n'est pas localisée en un seul point du cerveau. Cependant, contrairement à une croyance populaire, la mémoire n'est pas infinie. Cela est scientifiquement impossible car les informations sont stockées dans des réseaux neuronaux et le nombre de ces réseaux est fini (même s'il peut être gigantesque). Personne ne peut espérer mémoriser toute *l'Encycopedia Universalis*. Des recherches ont aussi montré que la capacité d'oubli est nécessaire à une bonne mémorisation. Le cas d'un patient suivi par le neuropsychologue Alexander Luri est assez éclairant : il possédait une mémoire qui semblait infinie, mais dont les mécanismes d'oubli ne fonctionnaient pas ; ce patient était incapable de trouver un emploi stable, si ce n'est comme « champion de la mémoire ». Il semble que le taux d'oubli des enfants soit le taux optimal pour se constituer une mémoire efficace (Anderson, 1990).

Quid des gens qui ont une mémoire visuelle presque photographique, très habiles à mémoriser une longue liste de numéros tirés au hasard, capables de jouer simultanément plusieurs parties d'échec, les yeux bandés ?… Les chercheurs en neurosciences attribuent ces performances à des modes de pensée spécialisés, plutôt qu'à un type de mémoire visuelle. Degroot (1965) s'est intéressé aux grands maîtres des échecs, les soumettant à des expériences où des positions sur l'échiquier étaient brièvement présentées; ces excellents joueurs devaient ensuite reconstituer les positions, ce qu'ils réussissaient parfaitement, sauf quand les positions présentées n'avaient aucune chance de se présenter lors d'une vraie partie. L'aptitude des grands joueurs à reconstituer les places sur l'échiquier n'était pas donc due à une mémoire visuelle, mais plutôt à une capacité d'organiser mentalement les informations d'un jeu qu'ils connaissaient parfaitement (conclusion proposée par Degroot). Ainsi, le même stimulus est perçu et compris différemment selon la connaissance que le sujet a de la situation.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Pourtant, certaines personnes semblent vraiment posséder une mémoire visuelle étonnante, qui garderait une image pratiquement intacte. On parle alors de « mémoire eidétique ». Ces personnes peuvent, par exemple, épeler une page entière écrite dans une langue inconnue, qu'elles ont vue très brièvement, un peu comme si elles avaient pris une photo de la page. Cependant, l'image eidétique ne se forme pas dans le cerveau comme une photographie, ce n'est pas une reproduction, mais une construction. Il faut du temps pour la former; les personnes disposant d'un tel type de mémoire doivent regarder l'image pendant au moins trois à cinq secondes pour pouvoir en inspecter chaque point. Une fois cette image formée dans le cerveau, les sujets sont capables de décrire ce qu'ils ont vu, comme s'ils regardaient ce qu'ils décrivent. Par contraste, les sujets normaux (sans mémoire eidétique) sont plus hésitants dans leur description. Il est intéressant et troublant de savoir qu'une plus grande proportion d'enfants que d'adultes semble posséder une mémoire eidétique (Haber et Haber, 1988). Comme si l'apprentissage, ou l'âge, faisait diminuer cette capacité. Haber et Haber ont ainsi montré que 2 à 15 % des enfants en âge d'aller à l'école primaire possédaient une mémoire eidétique. Leask et ses collaborateurs (1969) ont montré que la verbalisation durant l'observation d'une image interférait avec la capture eidétique de l'image, donnant ainsi une explication possible de la perte de la mémoire eidétique avec l'âge. Kosslyn (1980) a aussi essayé d'expliquer cette corrélation négative entre la mémorisation visuelle et l'âge. Selon ses études, les adultes sont capables d'encoder de l'information en utilisant des mots, mais non les enfants, qui n'ont pas encore fini de développer leurs aptitudes verbales. Il manque encore des résultats scientifiques pour confirmer ou contredire cette théorie. Des études d'imagerie cérébrale sont nécessaires.

Il existe de nombreuses techniques pour améliorer sa mémoire, mais elles agissent toujours sur un type particulier de mémoire seulement, qu'il s'agisse de moyens mnémotechniques, de répétitions d'un même stimulus, de la création de cartes conceptuelles (donner un sens à des choses qui n'en ont pas forcément pour les apprendre plus facilement), etc. Joseph Novak a beaucoup étudié les cartes conceptuelles (Novak, 2003) et a noté, chez les étudiants en physique des lycées, une augmentation significative des aptitudes à résoudre des problèmes grâce à l'utilisation des cartes conceptuelles. Cependant, il manque encore une étude en imagerie cérébrale pour définir les zones cérébrales activées lors de ces différents processus. On a pu cependant remarquer que selon que le sujet était novice ou non dans la matière concernée, des zones différentes du cerveau étaient activées[9]. De nombreuses études neurologiques sont donc encore nécessaires pour comprendre comment fonctionne la mémoire. De grandes diversités individuelles existent, et un même individu, au cours de sa vie, utilisera sa mémoire différemment selon son âge. Ce que la science a confirmé concrètement, c'est que l'exercice physique, une utilisation active du cerveau et un régime alimentaire équilibré, incluant des acides gras, aident à développer la mémoire et diminuent les risques de maladies dégénératives (voir le chapitre 3).

Les questions relatives à l'utilisation de la mémoire dans les méthodes actuelles d'enseignement (et, singulièrement, dans le rôle crucial joué par la mémoire dans les systèmes d'évaluation/certification), devront vraisemblablement être reconsidérées à l'avenir, à la lueur des nouvelles découvertes neuroscientifiques. De nombreux programmes mettent en jeu davantage la mémoire que la compréhension. La réponse à la question

9. Ce qui corrobore nombre d'autres observations à propos de l'expertise et de la façon dont elle se reflète dans les structures cérébrales.

« N'est-il pas préférable d'apprendre à apprendre ? » dépasse bien entendu le cadre des neurosciences ; mais il n'empêche qu'elle se doit d'être posée, quels que soient les résultats des études futures sur le fonctionnement cérébral.

« Apprenez en dormant ! »

Apprendre en dormant : quelle idée fascinante… et séduisante ! Apprendre rapidement, facilement, confortablement et sans effort est le rêve, sans doute, d'une grande majorité. Cependant, même les plus enthousiastes reconnaissent que si l'on peut acquérir des connaissances en dormant, on n'apprend pas ainsi à les utiliser. Est-ce totalement un mythe, ou existe-t-il une part de vérité dans cette affaire ?

Les méthodes utilisées pour asseoir ce genre de théories supposent d'abord que de l'information est répétée pendant le temps de sommeil. Par exemple, des messages, des textes sont continuellement ressassés à un dormeur par l'intermédiaire d'un magnétophone ou d'un lecteur de CD. Des entreprises commerciales ont promis des succès phénoménaux en prétendant que l'apprentissage en dormant était non seulement possible, mais plus efficace que tout apprentissage à l'état de veille. L'idée s'est ainsi propagée pendant la Seconde Guerre mondiale, où des espions auraient appris en dormant les dialectes, les accents, les habitudes, les coutumes des pays dans lesquels ils allaient être envoyés. C'est dans la science-fiction que l'on trouve l'origine de ce type d'apprentissage : il est décrit pour la première fois dans un livre de Hugo Gernsback, *Ralph 124 C41+ : A Romance of the Year 2660*, paru en 1911. À peu près vingt ans plus tard, Aldous Huxley décrit des enfants apprenant pendant leur sommeil dans son *Meilleur des mondes*. Ces histoires d'apprentissage pendant le sommeil dans des mondes utopiques (ou dystopiques) se sont ainsi peu à peu répandues dans le monde réel. Plusieurs théories tentent d'expliquer comment ce mode d'apprentissage peut fonctionner, mais elles restent vagues et contradictoires. L'une d'entre elles avance que l'acte d'apprendre commence toujours par un processus inconscient et qu'il est donc plus efficace pendant le sommeil que pendant l'éveil. Pour le moment, aucune étude scientifique sérieuse ne justifie cette idée.

Cependant, certains travaux qui ont essayé de mettre en évidence un apprentissage réussi pendant le sommeil méritent d'être rappelés. Ce sont surtout des études russes ou provenant de l'ancienne Europe de l'Est communiste. Kulikov (1968) a conduit ses recherches en présentant une narration à des enfants endormis d'un sommeil naturel (une histoire écrite par Tolstoï). L'un des douze sujets présentait des souvenirs du texte à son réveil. Dans un second groupe, Kulikov a d'abord établit un contact avec ses sujets d'expérience pendant qu'ils dormaient, à l'aide de phrases enregistrées comme « vous dormez tranquillement, ne vous réveillez pas ». Après ces phrases, le texte était diffusé, suivi par d'autres phrases demandant de se souvenir du texte et de continuer à dormir calmement. Ces propositions semblaient avoir un réel impact sur les performances des sujets à se remémorer, une fois éveillés, les textes lus. Les sujets à qui les textes avaient été lus pendant leur sommeil semblaient s'en souvenir aussi bien que des sujets éveillés à qui on avait lu les mêmes textes. D'autres études plus longues ont suivi en Russie et en Europe de l'Est, toujours avec des instructions données avant l'endormissement (pour une revue, voir Hoskovec, 1966, Rubin, 1968). Sur la base des résultats de ces études, l'apprentissage en dormant fut pratiqué intensément dans les pays de l'ancienne Union soviétique, surtout pendant les années 50 et 60. Il a été dit que des langues ont été apprises non seulement par des individus qui dormaient mais aussi par des villages entiers grâce à des diffusions radiophoniques nocturnes (Bootzin et autres, 1990).

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Ces études souffraient cependant de nombreux défauts, ce qui soulève des doutes sur l'efficacité réelle de l'apprentissage pendant le sommeil. Souvent, les chercheurs indiquaient que l'apprentissage fonctionnait sur des sujets « sensibles », sans jamais définir clairement ce qu'ils entendaient par « sensible » dans un tel contexte, le sens variant de « sujet sensible à l'hypnose » à « sujet persuadé de l'efficacité de l'apprentissage en dormant ». Une autre carence de ces expériences tenait au mauvais contrôle de l'état de sommeil : on pense ainsi que des sujets pouvaient être légèrement éveillés. En général, les informations à retenir n'étaient pas diffusées pendant le sommeil profond ; de plus, il n'y avait pas de contrôle de l'état du sommeil à l'électroencéphalogramme (EEG), comme c'était le cas dans les études menées dans le monde occidental. Les informations étaient plutôt diffusées au commencement du sommeil ou au petit matin, moments où les enregistrements de l'EEG montrent surtout des ondes alpha (Aarons, 1976). Il est ainsi probable que les sujets n'étaient pas profondément endormis pendant la diffusion des informations mais plutôt dans un état « d'endormissement léger », et, d'une certaine façon, encore conscients. L'analyse de ces conditions explique les résultats si souvent positifs de chercheurs d'Europe de l'Est, mais ne porte pas à y ajouter foi.

Les chercheurs du monde occidental n'ont pas trouvé de preuves d'un apprentissage réussi pendant le sommeil. Ils ont pu cependant montrer un effet pendant les anesthésies (Schacter, 1996). Traditionnellement, les patients sous anesthésie sont considérés comme étant dans un état de sommeil d'où ils ne perçoivent rien. Dans les années 60, les expériences suivantes ont été menées : pendant que le patient était sous anesthésie, les chirurgiens prétendaient qu'il y avait une urgence. Lorsque à leur réveil les patients étaient questionnés sur leur opération, certains étaient très agités. On en avait conclu que les patients devaient avoir retenu implicitement quelque chose de la période pendant laquelle ils étaient endormis (Levinson, 1965). Dans d'autres études, des patients récupéraient mieux de leur opération sous anesthésie générale si pendant celle-ci il avait été dit qu'ils allaient se rétablir rapidement.

Toutefois, ces études n'étaient pas sans défauts non plus. Premièrement, l'anesthésie n'est pas le sommeil et ne peut pas lui être directement comparée. Deuxièmement, les patients réveillés ne pouvaient pas se souvenir explicitement de ce qu'ils avaient subi ou entendu pendant l'opération. L'agitation ou la récupération ne sont pas des critères assez sensibles pour évaluer la mémoire. Troisièmement, la nature et l'efficacité des anesthésiants pouvaient créer une différence dans le processus de mémorisation (Schacter, 1996). Quatrièmement, des études ultérieures n'ont pas réussi à reproduire le phénomène. Elles ont plutôt suggéré qu'il n'était pas possible de se souvenir des événements intra-opératoires, que le patient soit conscient ou non pendant l'opération. Aucune étude sur l'apprentissage pendant le sommeil menée dans les pays occidentaux, avec un contrôle strict par EEG de l'état du sommeil, n'a pu mettre en évidence un apprentissage (Bootzin et autres, 1990 ; Wood, 1992).

Il n'y a donc pas un grain de vérité dans le mythe de l'apprentissage en dormant. Bien que la fonction précise du sommeil reste un mystère, les études récentes montrent qu'il joue différents rôles dans le développement du cerveau et dans son fonctionnement. Il est aussi bénéfique pour la consolidation de compétences, comme l'apprentissage moteur. Par exemple, la mémorisation de séquences spécifiques de tapage de doigts s'améliore lorsque l'entraînement est suivi de périodes de sommeil (Kuriyama et autres, 2004 ; Walker et autres, 2002). De même, le sommeil pendant la première moitié de la nuit favorise la

mémoire factuelle alors que la seconde moitié de la nuit favorise la mémoire des compétences (Gais et Born, 2004).

Jusqu'à présent, de nombreuses études ont montré que le sommeil modifie la mémorisation des choses apprises juste avant l'endormissement (Gais et Born, 2004). Les premiers résultats concernaient l'apprentissage de faits : des histoires courtes et des syllabes dépourvues de sens étaient mieux retenues si elles précédaient de peu le sommeil (Jenkins et Dallenbach, 1924 ; van Ormer, 1933). Les réflexes conditionnés peuvent aussi être appris pendant le sommeil. Un réflexe conditionné est l'association de deux stimuli : un stimulus conditionnant (SC), une sonnerie, par exemple, qui est présenté simultanément ou juste avant le stimulus non conditionnant (SNC) : un choc électrique au doigt, par exemple. Le SNC provoque généralement une réponse forte, comme le retrait du doigt après le choc électrique. Après plusieurs essais, le sujet apprend à associer les deux stimuli, et réagit même si seul le SC est produit (le sujet retire son doigt au son de cloche, qu'il y ait choc électrique ou non). Des études ont montré qu'un tel « réflexe conditionné » peut être appris pendant le sommeil et maintenu à l'éveil (Ikeda et Morotomi, 1996; Beh et Barratt, 1965) alors que d'autres études ont montré la voie inverse : la réponse conditionnée est apprise pendant l'éveil et maintenue pendant le sommeil (McDonald et autres, 1975).

Aucun fait scientifique ne prouve qu'il est possible d'apprendre quoi que ce soit en dormant. De plus, que ce soit en dormant ou non, on ne peut pas tout apprendre par de simples répétitions. Pour apprendre une langue étrangère, les sciences naturelles, la physique, etc., des efforts conscients sont nécessaires. Les CD à écouter en dormant ne promettent pas seulement d'apprendre mais permettraient aussi d'arrêter de fumer ou de perdre du poids. Pourtant, aucune preuve scientifique de tout cela n'a été rapportée. Peut-être n'est-ce pas le CD qui fait arrêter de fumer ou perdre du poids, mais la motivation. L'apprentissage en dormant continue d'être un mythe. Il semble hautement improbable de voir un jour de telles méthodes préconisées dans un programme scolaire ou universitaire.

Conclusions

Le cerveau est un phénomène à la mode. Il passe rarement une semaine sans qu'un acteur médiatique titre d'une façon ou d'une autre sur les mystères de cette boîte noire. Un tel engouement s'explique tout à la fois par l'intérêt naturel que suscite l'objet chez la plupart des gens (« si on parle de mon cerveau, on parle de moi »), ainsi que par la densité de nouveautés mises en lumière par la recherche neuroscientifique, dont les médias sont friands. L'attrait médiatique pour le sujet ne va pas sans quelques dérapages. C'est ainsi que l'on a vu croître et multiplier, au cours des dernières années, une multitude de conceptions erronées à propos du cerveau, conceptions que l'on baptise depuis quelques années du nom de « neuromythes ».

La plupart des neuromythes répertoriés à ce jour (et dont les principaux sont décrits ci-dessus) sont nés dans des conditions similaires : ils s'appuient presque toujours sur des résultats scientifiques solides, et comportent donc une part de vérité (ce qui rend leur identification et leur réfutation d'autant plus malaisées); cependant, les résultats sur lesquels les neuromythes s'appuient sont soit mal compris, soit incomplets, soit exagérés, soit extrapolés, soit enfin tout cela à la fois. Cette difficulté est inhérente à la nature même du discours scientifique, et aux difficultés que l'on rencontre inévitablement à vouloir le traduire en langage quotidien (en ce sens, les médias, de par le caractère commercial de leur logique discursive, ne font qu'amplifier un phénomène inévitable). L'émergence d'un

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

neuromythe peut résulter d'un mouvement volontaire ou involontaire. Sans vouloir exagérer l'importance des distorsions pratiquées à dessein, on ne peut que constater les avantages que certains tirent de l'existence d'un ou plusieurs mythes de ce type. Il serait vain de nier que les neuromythes font souvent marcher le commerce. En conséquence, la présomption est forte selon laquelle si certains neuromythes naissent accidentellement, l'écrasante majorité doit sa survie et sa prospérité à des causes qui n'ont rien d'accidentel.

Qui est sensible aux neuromythes ? Potentiellement, tout le monde. Mais certains « publics cibles » sont évidents : ce sont, en premier lieu, tous les éducateurs, qu'ils soient parents, enseignants ou autres. Ce sont eux, en effet, les premiers consommateurs de biens éducatifs. À ce titre, ils représentent un terrain favorable à l'enracinement et à l'expansion des neuromythes « qui font vendre ». Force est de constater que, par ailleurs, les incertitudes qui planent sur le monde de l'éducation représentent un terrain particulièrement favorable à l'accueil de toute idée nouvelle qui se présenterait comme une panacée, ou simplement comme un embryon de solution. Dans un univers où l'éducation avancerait sûre d'elle-même, telle une légion prête à conquérir de nouveaux territoires sans se poser (trop) de questions, les demi vérités, les solutions toutes faites, les quarts de panacées et les mythes complets auraient moins de chance de proliférer. Mais en ce début de XXIe siècle, la réflexion et la pratique éducatives sont prises de trop de vertige pour développer des systèmes immunitaires efficaces. Les neuromythes ont donc encore un bel avenir devant eux.

Dissiper ou déboulonner les neuromythes est une tâche à laquelle le CERI s'est attelé depuis plusieurs années, tout en étant conscient des multiples difficultés qu'un tel travail suppose. D'abord, traiter des neuromythes expose le critique au feu des neuro-sceptiques, qui ne vont pas manquer de s'appuyer sur l'existence de fables oiseuses pour s'en prendre de manière indifférenciée à toute approche neuroscientifique des questions éducatives, aussi humble, sérieuse, et rigoureuse soit-elle. Ensuite, dénoncer comme tel un neuromythe revient à s'agiter avec un chiffon rouge devant un peloton d'exécution composé de ceux qui en profitent. Enfin, c'est accréditer l'idée selon laquelle les éducateurs font parfois preuve, dans le meilleur des cas, d'une touchante naïveté.

Les passerelles entre les neurosciences et l'éducation sont encore trop peu nombreuses. Pourtant, une analyse des mythes existant sur le fonctionnement du cerveau indique nettement qu'une plus grande coopération entre les deux domaines est nécessaire. Toute réforme de l'éducation qui se voudrait réellement au service des élèves se doit de tenir compte des études et des résultats neuroscientifiques, tout en gardant une certaine distance. De même, les chercheurs ne doivent pas s'exclure du monde éducatif et du monde en général. Ils sont dans l'obligation d'expliquer leurs travaux, de les rendre compréhensibles et accessibles. Ce n'est que par des échanges entre les différentes disciplines, entre les différents acteurs (chercheurs, enseignants, responsables politiques), qu'il sera possible de réaliser un système éducatif adapté au plus grand nombre, en respectant au mieux le rythme de chacun.

Références

Aarons, L. (1976), « Sleep-assisted Instruction », *Psychological Bulletin*, vol. 83, pp. 1-40.

Anderson, J. (1990), *The Adaptive Character of Thought*, Erlbaum, Hillsdale, NJ.

Baron-Cohen, S. (2003), *The Essential Difference: Men, Women and the Extreme Male Brain*, Allen-Lane, Londres.

Beh, H.C. et P.E.H. Barratt (1965), « Discrimination and Conditioning During Sleep as Indicated by the Electroencephalogram », *Science*, 19 mars, vol. 147, pp. 1470-1471.

Bootzin, R.R., J.F. Kihlstrom et D.L. Schacter (éd.) (1990), *Sleep and Cognition*, American Psychological Association, Washington.

Bruer, J.T. (2000), *The Myth of the First Three Years, a New Understanding of Early Brain Development and Lifelong Learning*, The Free Press, New York.

De Groot, A. (1965), « Thought and Choices in Chess », Mouton Publishers, La Haye.

Dehaene, S. (1997), *The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics, Allen Lane*, The Penguin Press, Londres.

Diamond, M. C. (2001), « Successful Ageing of the Healthy Brain », article présenté à la Conférence de l'American Society on Aging et du National Council on the Aging, 10 mars, Nouvelle-Orléans, LA.

Gabrieli, J. (2003), « Round Table Interview », *www.brainalicious.com*.

Gais, S. et J. Born (2004), « Declarative Memory Consolidation: Mechanisms Acting During Human Sleep », *Learning and Memory*, nov-déc., vol. 11, n° 6, pp. 679-685.

Gernsback, H. (2000), *Ralph 124C 41+: A Romance of the Year 2660*, Bison Books, University of Nebraska Press, Lincoln, NE.

Gopnik, A., A. Meltzoff et P. Kuhl (2005), *Comment pensent les bébés?*, Le Pommier (traduction de Sarah Gurcel).

Guillot, A. (2005), « La bionique », *Graines de Sciences*, vol. 7 (ouvrage collectif), Le Pommier, pp. 93-118.

Haber, R.N. et L.R. Haber (1988), « The Characteristics of Eidetic Imagery », dans D. Fein et L.K. Obler (éd.), *The Exceptional Brain*, The Guilford Press, New York, pp. 218-241.

Hoskovec, J. (1966), « Hypnopaedia in the Soviet Union: A Critical Review of Recent Major Experiments », *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis*, vol. 14, n° 4, pp. 308-315.

Huxley, A. (1998), *Brave New World* (edition réimprimée), Perennial Classics, HarperCollins, New York.

Ikeda, K. et T. Morotomi (1996), « Classical Conditioning during Human NREM Sleep and Response Transfer to Wakefulness », *Sleep*, vol. 19, n° 1, pp. 72-74.

Jenkins, J.G. et K.M. Dallenbach (1924), « Obliviscence during Sleep and Waking », *American Journal of Psychology*, vol. 35, pp. 605-612.

Kim, K.H. et autres (1997), « Distinct Cortical Areas Associated with Native and Second Languages », *Nature*, vol. 388, n° 6638, pp. 171-174.

Kosslyn, S.M. (1980), *Mental Imagery*, Harvard University Press, Cambridge, MA.

Kulikov, V.N. (1968), « The Question of Hypnopaedia », dans F. Rubin (éd.), *Current Research in Hypnopaedia*, Elsevier, New York, pp. 132-144.

Kuriyama, K., R. Stickgold et M.P. Walker (2004), « Sleep-Dependent Learning and Motor-Skill Complexity », *Learning and Memory*, vol. 11, n° 6, pp. 705-713.

Leask, J., R.N. Haber et R.B. Haber (1969), « Eidetic Imagery in Children: Longitudinal and Experimental Results », *Psychonomic Monograph Supplements*, vol. 3, n° 3, pp. 25-48.

Levinson, B.W. (1965), « States of Awareness during General Anaesthesia: Preliminary Communication », *British Journal of Anaesthesia*, vol. 37, n° 7, pp. 544-546.

Lorenz, K. (1970), *Studies in Animal and Human Behaviour*, Harvard University Press, Cambridge MA.

McDonald, D.G. et autres (1975), « Studies of Information Processing in Sleep », *Psychophysiology*, vol. 12, n° 6, pp. 624-629.

Neville, H.J. (2000), « Brain Mechanisms of First and Second Language Acquisition », présentation au premier forum « Brain Mechanisms and Early Learning », 17 juin, Sackler Institute, New York City, États-Unis.

Neville, H.J. et J.T. Bruer (2001), « Language Processing: How Experience Affects Brain Organisation », dans D.B. Bailey et autres (éd.), *Critical Thinking About Critical Periods*, Paul H. Brookes Publishing Co., Baltimore, pp. 151-172.

Novak, J.D. (2003), « The Promise of New Ideas and New Technology for Improving Teaching and Learning », *Cell Biology Education*, vol. 2, été, American Society for Cell Biology, Bethesda, MD, pp. 122-132.

OCDE (2002), « Une approche neuroscientifique de l'apprentissage », *Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage*, OCDE, Paris, pp. 69-77.

OCDE (2004), *Apprendre aujourd'hui, réussir demain : premiers résultats de PISA 2003*, OCDE, Paris, *www.pisa.oecd.org*.

van Ormer, E.B. (1933), « Sleep and Retention », *Psychological Bulletin*, vol. 30, pp. 415-439.

Ornstein, R. (1972), *The Psychology of Consciousness*, Viking, New York.

Rubin, R. (1968), *Current Research in Hypnopædia*, MacDonald, Londres.

Schacter, D.L. (1996), *Searching for Memory: The Brain, the Mind and the Past*, Basic Books, New York.

Scientific American (2004), « Do We Really Only Use 10 Percent of Our Brains? », *Scientific American*, juin.

Sperry, R.W., M.S. Gazzamiga et J.E. Bogen (1969), « Interhemispheric Relationships: The Neocortical Commissures; Syndromes of Hemisphere Disconnection », dans P.J. Vincken et G.W. Bruyh (éd.), *Handbook of Clinical Neurology*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam.

Walker, M.P. et autres (2002), « Practice with Sleep Makes Perfect: Sleep-Dependent Motor Skill Learning », *Neuron*, vol. 35, n° 1, pp. 205-211.

Wood, J. et autres (1992), « Implicit and Explicit Memory for Verbal Information Presented during Sleep », *Psychological Science*, vol. 3, pp. 236-239.

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE I

Chapitre 7

Éthique et organisation de la neuroscience de l'éducation

Science sans conscience n'est que ruine de l'âme.
François Rabelais

L'histoire humaine devient de plus en plus une course entre éducation et catastrophe.
Herbert George Wells

Ce chapitre traite de la constitution de la neuroscience de l'éducation elle-même – l'émergence de ce champ multidisciplinaire représente à n'en pas douter l'une des principales réussites du projet « Sciences de l'apprentissage et recherche sur le cerveau » du CERI. On y découvrira une grande variété d'activités et d'institutions transdisciplinaires récemment mises en place, qui toutes contribuent activement à la constitution du nouveau champ. Par ailleurs, la recherche dont il est question ici, ainsi que ses applications, sont chargées de défis à caractère éthique : ceux-ci sont ouvertement discutés et quelques choix sont clarifiés.

Pour que la neuroscience de l'éducation, en consolidant ses positions, puisse continuer à offrir ses contributions aux politiques et pratiques éducatives, il est nécessaire de s'intéresser au développement de ce champ de recherche pour lui-même, en tant qu'activité créant et appliquant ses connaissances au sein d'un vaste spectre de parties prenantes et d'intérêts. Ce chapitre discute ce point dans une double perspective. Premièrement, il traite de quelques-unes des questions éthiques qui se posent dès que l'on s'aventure sur ce terrain. Ces questions sont profondes et cruciales pour les applications présentes et futures de la neuroscience de l'éducation. Deuxièmement, ce chapitre envisage les développements actuels et à venir en matière tant d'organisation que de méthodologie. Bien que la méthodologie de la neuroscience de l'éducation n'en soit qu'aux débuts de son évolution, trois éléments nécessaires à une approche stratégique sont d'ores et déjà reconnus comme fondamentaux : le champ se doit d'être transdisciplinaire, bidirectionnel, et international.

Les défis éthiques qui attendent la neuroscience de l'éducation

> Notre pouvoir scientifique a dépassé notre pouvoir spirituel. Nos missiles sont bien guidés mais nos hommes le sont mal.
>
> *Martin Luther King Jr.*

Au cours des dernières décennies, de grands progrès en imagerie cérébrale ont été réalisés et, de ce fait, le fonctionnement du cerveau est plus visible, plus observé. Cela pose des questions éthiques : peut-on observer, explorer le cerveau d'êtres humains sans se poser de limites ? Quels sont les buts de ces observations ? À qui, à quels organismes peut-on diffuser ces observations ?

Traditionnellement, les règles d'éthique pour les recherches biomédicales touchant les êtres humains suivent le code de Nuremberg de 1949 et la déclaration d'Helsinki de 1964. Les grandes lignes en sont :

- Le consentement volontaire, informé du sujet est essentiel.
- Les considérations liées au bien-être du sujet sont prioritaires par rapport aux intérêts de la société ou aux intérêts scientifiques.
- Le sujet a la liberté de cesser l'expérimentation à tout moment.
- Le scientifique responsable de l'expérimentation doit être prêt à la stopper à tout moment.

De nos jours, de nouvelles questions éthiques sont apparues en raison des progrès scientifiques. Ainsi, dans le domaine des neurosciences, on peut relever que :

- De nouvelles techniques, en imagerie cérébrale par exemple, permettent d'explorer les fonctions cérébrales humaines avec de très bonnes résolutions spatiales et temporelles.
- Des substances sont capables d'altérer sélectivement des fonctions cérébrales, entraînant des changements psychologiques.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

- Des études thérapeutiques ont montré que des changements de comportement induisent des modifications dans les fonctions cérébrales.

Ces développements induisent de nouvelles réflexions sur les règles éthiques, qui vont bien au-delà des responsabilités des seules académies des sciences, car elles concernent les individus et la société dans son ensemble. Pour commencer, nous nous intéresserons aux progrès de l'imagerie cérébrale, puis au développement de produits agissant sur le cerveau, en réfléchissant aux différences entre médicaments et produits stimulants. Comme l'étude des fonctionnalités du cerveau permet aussi de mieux comprendre les processus d'apprentissage, nous essaierons d'aborder, dans un dernier temps, les questions relatives aux liens entre neurosciences et enseignement.

Dans quels buts et pour qui ?

Pour le moment, l'imagerie cérébrale permet d'explorer les zones cérébrales et les réseaux neuronaux en activité lors de tâches réalisées ou d'émotions ressenties dans des conditions expérimentales. Mais il est difficile d'anticiper sur l'état psychologique du patient. Vu les possibilités actuelles et le potentiel qu'elles recèlent, il est déjà important de réfléchir aux conditions d'utilisation de l'imagerie cérébrale. Faut-il limiter les résultats à la recherche ou à la thérapie? Dans ce dernier cas, le secret médical doit être préservé, comme pour toute action médicale. Ces informations ne doivent pas être diffusées aux banques, aux assurances, aux employeurs.

L'imagerie cérébrale pose aussi un autre problème : que se passe-t-il si un risque pathologique ou une pathologie sont découverts de façon fortuite? Une recherche au Stanford Center for Biomedical Ethics (USA) a révélé que 18 % des volontaires sains présentaient des anomalies cérébrales (Talan, 2005). Une personne peut avoir, par exemple, un kyste cérébral qui ne posera jamais de problème. Faut-il pourtant prévenir le sujet, quitte à l'inquiéter inutilement? Faut-il le traiter?

De même, un rapport collectif de l'INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale, France), rendu public en septembre 2005, préconise de procéder à un dépistage médical systématique, dès 36 mois, des « troubles de conduite chez l'enfant et l'adolescent » qui toucheraient entre 5 % et 9 % de la classe d'âge des 15 ans, selon des estimations internationales (INSERM, 2005). Les experts de l'INSERM préconisent « un repérage des perturbations du comportement dès la crèche et l'école maternelle » et, pour les enfants, des thérapies individuelles, voire, « en seconde intention », l'usage de médicaments ayant « une action antiagressive ». Bien que ce cas ne relève pas de l'imagerie cérébrale proprement dite, il la rejoint, car il traite de dépistage et de prévention et pose ainsi les mêmes questions : a-t-on le droit de traiter des sujets préventivement ? À qui doit-on révéler les résultats de dépistage (école, institution, éducateurs…) ? La publication de cette expertise a provoqué, en France, de nombreuses réactions négatives de médecins, psychologues et psychiatres. Il faut reconnaître que des questions immédiates surgissent quant à l'utilisation potentielle de telles techniques. On en est droit par exemple, d'imaginer qu'elles puissent être utilisées pour stigmatiser et exclure, et ce dès le plus jeune âge. Que dans certains contextes la politique puisse en venir à user (et abuser) de cette possibilité de « repérage médical » n'est pas de l'ordre de la fantaisie : on a déjà entendu parler du potentiel de l'imagerie cérébrale pour identifier des enfants potentiellement perturbateurs.

Il est toujours difficile de prévoir les progrès scientifiques. Peut-être qu'un jour, en imagerie cérébrale, il sera possible de déterminer sans ambiguïté l'état psychologique d'un

sujet, de savoir s'il ment, s'il a peur, s'il est sûr de lui. Il est donc important de revenir régulièrement sur les règles et conduites devant ces techniques. Les décisions politiques ne doivent pas présenter de conséquences irrémédiables sur le long terme et une veille scientifique ainsi qu'une information du public doivent avoir lieu continuellement.

Une autre question éthique se pose au niveau mondial. L'imagerie cérébrale est une technique coûteuse dont l'utilisation risque, de ce fait, d'être limitée aux pays les plus riches de la planète et à leurs populations. Ne doit-on pas déjà réfléchir aux moyens de la rendre accessible au plus grand nombre ? Qui pourra prendre des décisions globales quant à l'équité devant l'accès, et comment les sociétés les plus pauvres pourront-elles s'impliquer dans les débats ?

Questions éthiques concernant l'utilisation des produits agissant sur le cerveau

Les produits agissant sur le cerveau peuvent être soit des médicaments, soit des molécules ayant des effets autres que thérapeutiques. La frontière entre les deux n'est pas toujours nette, et c'est ce qui va soulever le plus de questions. Un médicament a une action thérapeutique, son but est de guérir une personne, c'est-à-dire d'améliorer son état de santé. Un stimulant ou un calmant ne sont pas destinés à lutter contre une maladie, que ce soit de façon curative ou préventive, ils améliorent une ou des fonctions chez des sujets sains. Mais, et c'est ce qui rend ténue la frontière entre médicament et simple produit, il n'est pas toujours facile de distinguer entre le normal et le pathologique : ce qui est normal pour un individu ne l'est pas forcément pour un autre. Ces différences d'appréciation sont évidentes lorsqu'il s'agit de savoir si un enfant présente un syndrome d'hyperactivité ADHD (« Attention Deficit Hyperactivity Disorder » : trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité) – les avis des parents, du médecin traitant, du pédiatre et de l'enseignant peuvent diverger – ou lorsqu'il faut décider de la prise ou non d'un somnifère.

La discipline qui produit des substances agissant sur le cerveau est la psychopharmacologie. Au début du XXe siècle, plusieurs remèdes traditionnels à base de plantes ont été utilisés comme composants psychiatriques, ainsi l'opium, le cannabis et l'alcool (Calvino, 2003). Vers les années 50, des produits psychopharmacologiques sont apparus pour améliorer des états mentaux. On a ainsi vu l'apparition des tranquillisants et des antidépresseurs. Dans la seconde moitié du XXe siècle, la recherche en psychopharmacologie a explosé, avec la production de nombreuses substances. Dans son livre, *Listening to Prozac*, Peter Kramer (Kramer, 1997) fut le premier à soulever la question de l'utilisation des antidépresseurs comme une médicamentation de soutien : de nombreuses personnes en prennent alors qu'elles sont en parfaite santé et présentent simplement une tendance dépressive[1]. Certaines substances sont aussi utilisées pour stimuler le cerveau, développer la mémoire. Que leur efficacité soit ou non démontrée, la question est de savoir s'il est opportun d'utiliser de telles substances alors que le sujet est sain. Il est maintenant nécessaire de réguler l'utilisation de toute molécule agissant sur le cerveau, en définissant les différents niveaux de responsabilité : l'État, le médecin, les parents. Quelles sont les substances commercialisées, sous quelles formes, par qui, pour qui ? Il n'est pas toujours facile de trouver l'équilibre entre vie privée et responsabilité. Les parents ont des droits sur leurs enfants, mais ils ont aussi une responsabilité : peut-on les autoriser à administrer à leurs enfants des substances stimulant leur réussite scolaire (mémoire, attention) alors que les dangers et l'utilité de ces substances ne sont pas clairement définis ?

1. La tendance dépressive est un sentiment de découragement, de tristesse, mais n'est pas un état pathologique, contrairement à la dépression.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Pour éviter les utilisations abusives, non appropriées de ces produits, il est nécessaire de tenir le public informé ; un effort dans ce sens doit être fourni par la communauté scientifique. Par ailleurs, si des substances sont reconnues d'intérêt, elles doivent être accessibles au plus grand nombre grâce à un prix de vente adéquat. Enfin, comme pour les techniques d'imagerie cérébrale, un suivi scientifique et politique doit avoir lieu afin de ne pas prendre de décisions irrémédiables.

Interface cerveau-machine – qu'est-ce qu'être humain?

Actuellement, certains chercheurs tentent d'associer du vivant et de la technologie, créant ainsi ce que l'on a appelé la bionique (Guillot, 2005). Il s'agit d'intégrer des équipements artificiels (prothèses électroniques ou mécaniques) dans du vivant ou d'intégrer des organes vivant dans de l'artificiel. Ces recherches visent aussi les composants nerveux et concernent ainsi les neurosciences. Par exemple, il arrive que des organes sensoriels, comme la rétine ou la cochlée, soient endommagés sans que les voies nerveuses soient atteintes. On peut alors implanter des organes sensoriels artificiels qui vont interpréter les informations lumineuses, mécaniques ou chimiques de l'environnement et les transformer en signaux électriques, y compris par les voies nerveuses. Ces recherches visent essentiellement à améliorer des handicaps, mais elles peuvent aussi inquiéter : que penser par exemple d'expériences où des rats sont télécommandés par un programme d'ordinateur grâce à des électrodes implantées dans leur cerveau? Là aussi, les expériences doivent être sévèrement contrôlées, non seulement par les scientifiques, mais aussi par la société tout entière.

Certaines recherches tâchent de faire contrôler à distance une structure robotique par le cerveau : ainsi, des rats ont pu diriger à distance des bras robotiques qui leur donnent de l'eau, un singe a réussi, sans contact physique, à déplacer sur un écran un curseur vers une cible. Cela commence aussi à se faire à partir de cerveaux humains, notamment avec des handicapés moteurs. Pour arriver à ces résultats, on a d'abord enregistré l'activité cérébrale des animaux ; ensuite, un ordinateur relié à un bras manipulateur a été programmé de façon à ce que l'enregistrement cérébral correspondant à la « volonté de déplacement » déclenche le mouvement. On voit bien l'avantage de ces recherches pour des personnes handicapées moteur (tétraplégiques par exemple) qui pourraient ainsi commander plusieurs appareils à distance. Cependant, on comprend aussi aisément que ces expériences doivent être sévèrement contrôlées.

Les risques d'une approche trop scientifique de l'éducation?

En s'intéressant au développement cérébral, les neurosciences s'occupent particulièrement de l'enseignement et de l'apprentissage. Est-il dangereux de se diriger vers une approche trop scientifique de l'apprentissage? Les neurosciences peuvent aider à rénover l'enseignement en ce qu'elles apportent une meilleure connaissance des processus cérébraux impliqués dans l'apprentissage. Si l'on arrive à comprendre pourquoi certains élèves ont des difficultés en mathématiques et d'autres non, on pourra adapter l'apprentissage des mathématiques pour ces personnes, en tentant d'en changer l'approche pédagogique. On peut espérer ainsi atteindre un enseignement adapté à chaque élève pour chaque discipline. Depuis les travaux de Howard Gardner sur les intelligences multiples (Gardner, 1983), cette idée de l'enseignement adapté s'est développée, même si Gardner lui-même revient sur ce principe (Gardner, 2000). On pourrait étendre cela aux enseignants. Il se peut que, grâce aux neurosciences, et à l'imagerie cérébrale en

particulier, nous soyons un jour capables de déterminer ce qu'est un « bon » maître : on pourra vérifier si les notions apprises sont bien comprises, bien intégrées par les élèves en analysant leur cerveau. Ne court-on pas ainsi le risque de sélectionner seulement un type d'enseignants, correspondant aux normes de l'époque, et de créer un système éducatif à la fois hautement scientifique et affreusement standardisé et conformiste ?

Ces scénarios posent la question générale des buts de l'éducation : s'agit-il de former des individus spécialisés ou de former une société de citoyens avec une culture commune ? Les neurosciences peuvent apporter des réponses à la recherche d'un enseignement de meilleure qualité, ouvert sur le plus grand nombre, mais elles peuvent aussi engendrer des abus. Bruer, qui fut l'un des premiers à préconiser un enseignement fondé sur les neurosciences (« Brain-based education ») est aussi maintenant l'un des plus critiques vis-à-vis de cette notion (Bruer, 1993).

Nous avons vu que, en effet, les développements récents des sciences du cerveau posent de nombreuses questions. La plupart ne sont pas propres aux neurosciences : la protection individuelle pour l'imagerie cérébrale se rapproche du secret médical, le contrôle des molécules agissant sur le cerveau s'applique à toute molécule nouvellement synthétisée ou découverte, les recherches en interface cerveau-machine sont soumises aux règles générales concernant la recherche scientifique. Cependant, comme les neurosciences s'intéressent au cerveau, l'organe qui, à notre époque, semble le plus noble (car organe de décision et de liberté), certaines applications peuvent soulever plus d'inquiétude et de réticence (le contrôle d'un cerveau vivant par une machine en fournit un bon exemple). Devant ces craintes, justifiées, des organismes se sont déjà mis en place dont les préoccupations recoupent assez bien les questions soulevées dans cette section.

Créer une nouvelle approche transdisciplinaire pour comprendre les apprentissages

> « Par le passé, la transdisciplinarité, la construction de passerelles et la fusion de concepts rassemblant des domaines profondéments divergents étaient le privilège exclusif du génie, mais, au XXIe siècle, de tels outils doivent être mieux partagés. […] La mise en œuvre d'une éducation transdisciplinaire qui rendra possibles de futures études transdisciplinaires est un besoin urgent que nous devons satisfaire pour le bénéfice des générations futures. »
>
> *Hideaki Koizumi*

Transdisciplinarité

Dans la Grèce antique, la connaissance n'était pas divisée en disciplines distinctes, et les savants passaient librement d'un champ d'études à un autre. L'influence du réductionnisme, apparu avec Aristote, n'a cessé de se développer depuis, entraînant la création de domaines nettement délimités (voir le graphique 7.1a), qui ont chacun évolué de manière indépendante et donné naissance à des outils analytiques spécialisés. Aujourd'hui, une telle approche « disciplinaire » se fait tout à la fois plus nécessaire et plus insuffisante. La plus grande précision apportée par la spécialisation (conséquence d'une approche discipline par discipline) est indispensable, et cette forme d'organisation permet de gérer un énorme volume de connaissances. Mais alors qu'avec le temps les disciplines évoluent vers la

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

maturité, elles se trouvent de plus en plus isolées, les murs qui les séparent s'élèvent et s'épaississent, et les frontières entre elles sont de moins en moins rationnelles et adaptées. Une approche disciplinaire statique empêche de passer d'un domaine à l'autre quand cela devient nécessaire pour avancer vers une meilleure compréhension.

Aujourd'hui, les rapports entre neuroscience et éducation illustrent bien cette situation. De récentes avancées en neuroscience ont fourni des éléments importants pour l'éducation. En parallèle, la recherche en sciences de l'éducation a accumulé un grand nombre de données relatives à l'apprentissage. Il est évident que la neuroscience pourrait apporter une dimension nouvelle et importante à l'étude de l'apprentissage, et que ce que les éducateurs en savent pourrait aider la neuroscience à traiter des questions les plus pertinentes. Mais les deux domaines sont déjà bien en place, leurs cultures sont solidement ancrées, leurs méthodes et leur langage sont spécifiques, et les spécialistes d'un domaine ont beaucoup de mal à utiliser les connaissances de l'autre.

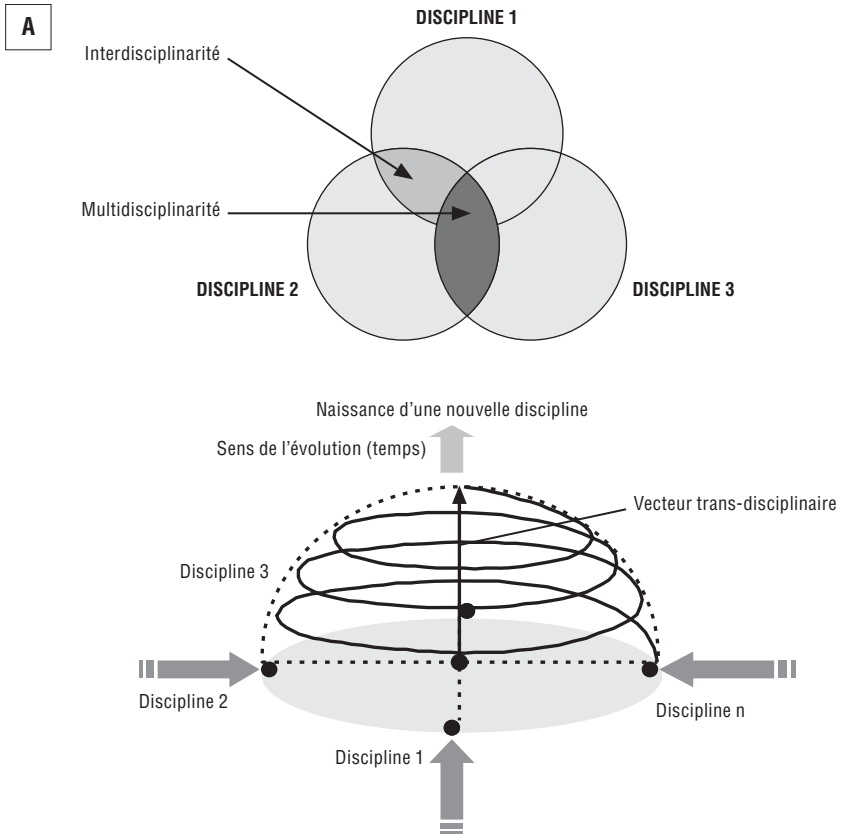
De nos jours, quand des disciplines parviennent à maturité, on a besoin d'une métastructure dynamique pour les unir et les préciser. Grâce à cette métastructure, chaque discipline devient un outil permettant de faire évoluer les connaissances, et peut s'adapter et évoluer selon les besoins. Pour la neuroscience et l'éducation, l'étude de l'apprentissage fait naître un tel besoin : comprendre l'apprentissage est fondamental pour assurer la croissance économique, la cohésion sociale et le développement de l'individu.

La fusion de la neuroscience, de l'éducation et d'autres disciplines pertinentes, donc la création d'un champ de recherche transdisciplinaire, est la meilleure façon de relier le travail sur l'apprentissage effectué par chaque spécialité et de passer outre les murailles élevées entre les disciplines (voir le graphique 7.1a). (Pour une discussion plus détaillée des termes « transdisciplinarité », « multidisciplinarité » et « interdisciplinarité » tels qu'utilisés ici, voir Koizumi, 1999). La collaboration entre deux disciplines installées semble insuffisante pour catalyser une fusion transdisciplinaire; il faut réunir davantage de domaines. Tandis que se construisent les ponts entre les différents domaines, une nouvelle discipline, possédant ses propres méthodes et disposant d'une organisation sui generis va pouvoir émerger. Elle s'intégrera à la métastructure dynamique et contribuera à son tour à l'évolution transdisciplinaire (voir les graphiques 7.1b et c). De plus, elle pourra faire évoluer les disciplines-mères dont elle est issue (voir le graphique 7.1d). Ce processus peut d'ailleurs concerner de nombreuses disciplines en même temps, et donner naissance à une évolution dynamique du savoir (voir le graphique 7.1e).

La neuroscience de l'éducation est déjà en train de se développer (voir l'encadré 7.1)[2]. On assiste à la formation de réseaux multidisciplinaires destinés à travailler sur des sujets transdisciplinaires. Le *Centre for Neuroscience in Education* de l'université de Cambridge et le *Learning Lab Denmark* (LLD) de l'Université danoise d'éducation, par exemple, s'occupent de questions transdisciplinaires (voir les encadrés 7.2 et 7.3). De plus, il existe à présent des programmes destinés à former des spécialistes transdisciplinaires en neuroscience de l'éducation (entre autres à Cambridge, Dartmouth, et Harvard – voir l'encadré 7.4). Il s'agira d'abord de collaborations multidisciplinaires, et des experts d'autres disciplines peuvent contribuer à relier les domaines. À mesure que les spécialistes transdisciplinaires seront plus nombreux, le nouveau champ de recherche pourra évoluer. Beaucoup d'éducateurs et de scientifiques sont déjà en train de préparer le terrain pour ces futurs spécialistes en

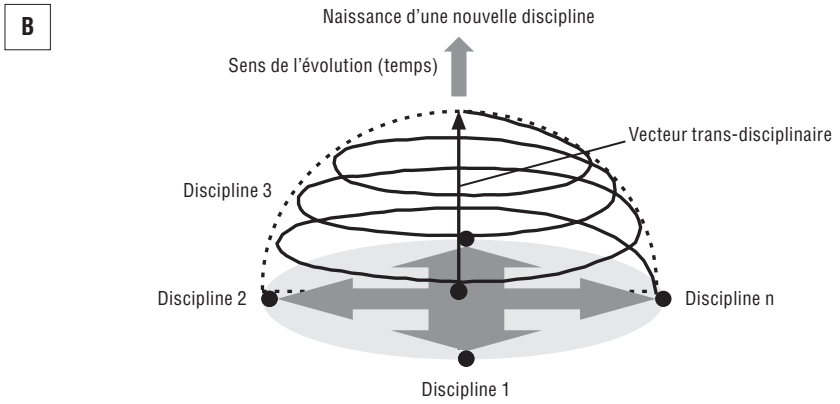
2. Cet encadré et les suivants ont été rédigés et fournis par les institutions concernées.

Graphique 7.1. **L'évolution de la transdisciplinarité**



Note : Ce modèle oppose travail interdisciplinaire ou multidisciplinaire et travail transdisciplinaire. Le travail interdisciplinaire ou multidisciplinaire implique de superposer respectivement deux ou plusieurs disciplines déjà bien en place, alors que le travail transdisciplinaire consiste à faire fusionner plusieurs disciplines pour en faire naître une nouvelle. La neuroscience de l'éducation va devoir se transformer en un champ transdisciplinaire.

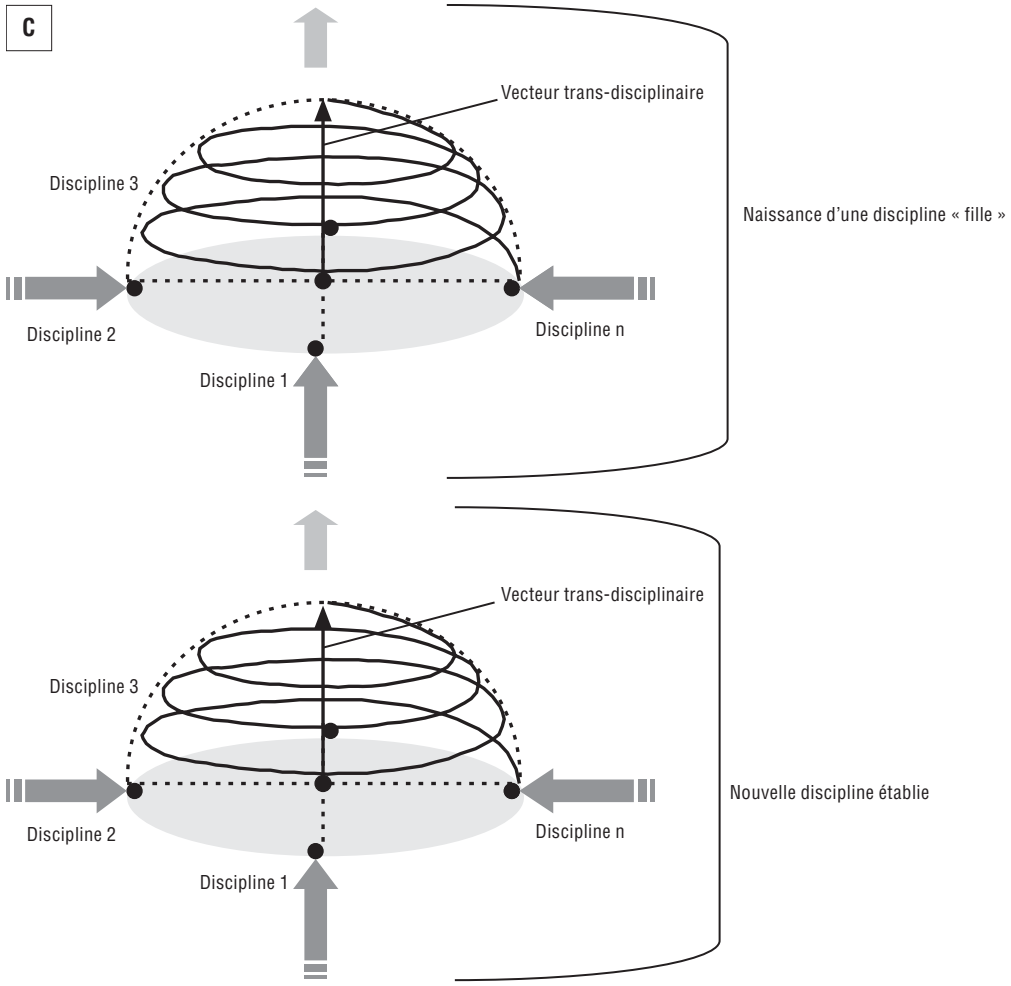
Source : Adapté de Hideaki Koizumi (1999), « A practical approach towards trans-disciplinary studies for the 21st century », *J. Seizon et Life Sci.*, vol. 9, pp. 5-24.



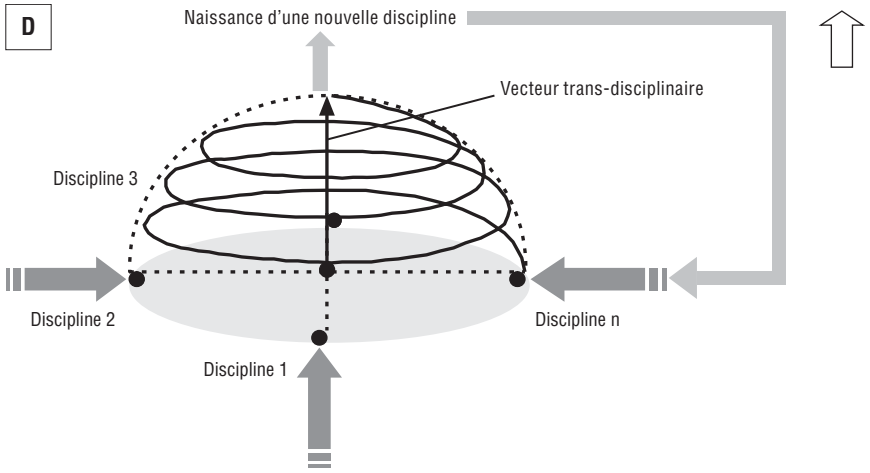
Note : Lorsqu'un champ transdisciplinaire est parvenu à maturité, il peut intégrer la métastructure dynamique en tant que discipline à part entière, capable de contribuer à l'évolution de l'ensemble.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Graphique 7.1. **L'évolution de la transdisciplinarité** *(suite)*

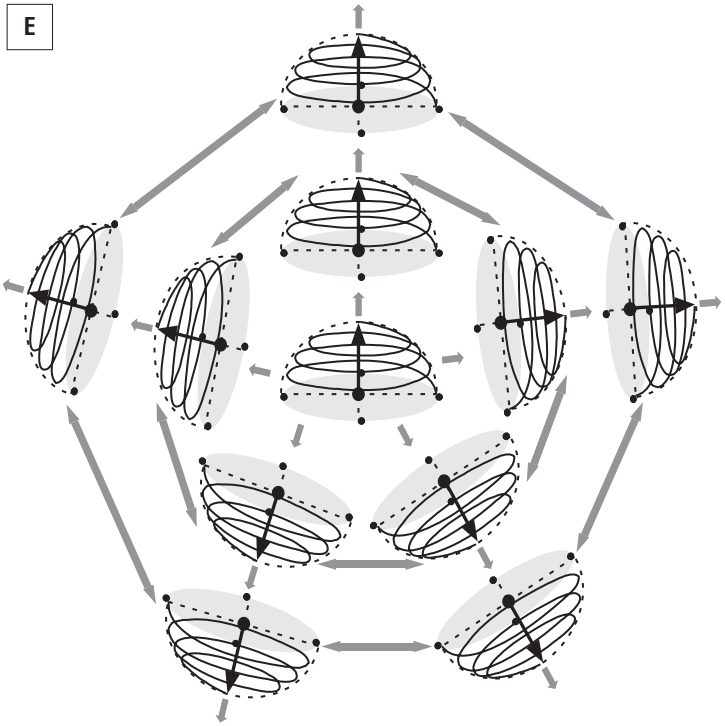


Note : Une fois qu'une nouvelle discipline est établie, elle peut se subdiviser pour donner naissance à une nouvelle discipline.



Note : Les nouveaux champs transdisciplinaires peuvent contribuer à l'évolution qui leur a donné naissance, mais également faire évoluer en retour les disciplines dont ils sont issus.

Graphique 7.1. **L'évolution de la transdisciplinarité** *(suite)*



Note : Les disciplines mères peuvent donner naissances à plusieurs disciplines simultanément. Celles-ci peuvent alors en créer d'autres, et ainsi de suite.

créant des laboratoires, des écoles, des revues, des sociétés et des forums de discussion transdisciplinaires.

Pour pouvoir avancer, il est indispensable d'établir un vocabulaire commun. Pour le moment, certains termes ont des sens différents selon la discipline – même des mots aussi importants que « apprentissage » (voir les chapitres 1 et 2). Cela peut créer des malentendus ou des incompréhensions. Il est possible de combiner des définitions propres à chaque discipline pour en créer d'autres, plus complètes, utilisables par tous. Par exemple, pour les éducateurs, l'apprentissage est une entreprise sociale; on peut relier cette idée au point de vue des neuroscientifiques, pour qui l'apprentissage est un phénomène cérébral à l'échelle moléculaire. Selon les théories constructivistes traditionnelles, l'apprenant ne reçoit pas passivement le sens, mais le construit activement. La théorie participative ajoute qu'il est construit dans les limites d'un environnement socioculturel donné. Pour la théorie de l'éducation, l'apprentissage est donc un processus actif soumis aux influences socioculturelles. D'un point de vue neuroscientifique, l'apprentissage est une succession d'événements moléculaires entraînant une modification structurelle qui influencera l'apprentissage ultérieur. L'apprentissage peut donc être décrit comme une série d'adaptations des structures cérébrales, influencées par l'environnement socioculturel, et entraînant des conséquences fonctionnelles.

Il faudra également établir une méthodologie commune. La recherche en éducation utilise une large gamme de méthodes, allant de l'analyse quantitative (de corrélations) à l'ethnographie. La neuroscience de l'éducation va probablement en mettre au point un certain nombre d'autres. À mesure que cette discipline va se développer, il faudra les expliciter et les détailler. Il serait également utile d'unifier les outils de mesure. Aligner les

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Encadré 7.1. **Esprit, cerveau et éducation (« Mind, Brain and Education » ou « MBE »)**

Aujourd'hui, la société attend de la biologie – neuroscience, génétique et science cognitive – qu'elle éclaire théories et pratiques éducatives, et permette de les améliorer. À la Harvard Graduate School of Education, plusieurs départements ont lancé un programme sur l'esprit, le cerveau et l'éducation (MBE), sous l'impulsion des besoins de la société et de l'intérêt manifesté par les étudiants. Pour acquérir des connaissances utilisables sur l'éducation, il faut relier recherche et pratiques éducatives, comme on relie biologie et médecine. La recherche informe les pratiques, qui elles-mêmes éclairent la recherche. Le programme MBE forme les gens à établir ces liens.

Heureusement, beaucoup de jeunes chercheurs brillants ont rejoint le programme dans le cadre de leurs master ou de leur doctorat et y apportent leur contribution. Le désir de relier biologie, science cognitive et éducation est apparu dans plusieurs régions du monde : l'OCDE a lancé son programme sur les neurosciences et l'éducation au sein du CERI. Le Japon a été à l'origine d'importants travaux de recherche sur le sujet. Des conférences biannuelles sur le cerveau et l'apprentissage ont été organisées à Boston, et parfois ailleurs, à l'intention des éducateurs et des scientifiques. L'Académie pontificale des sciences a organisé une conférence internationale sur l'esprit, le cerveau et l'éducation pour son 400e anniversaire en novembre 2003. Les universités de Cambridge et de Dartmouth, parmi d'autres, ont mis en place des programmes parallèles au MBE. Beaucoup de scientifiques et d'éducateurs collaborent aujourd'hui pour asseoir l'éducation dans la recherche scientifique.

De telles marques d'intérêt ont montré qu'il fallait créer une organisation permettant de promouvoir la recherche et la pratique unissant biologie, science cognitive et éducation. Un groupe international a fondé la Société Internationale pour l'esprit, le cerveau et l'éducation (« International Mind, Brain and Education Society » ou « IMBES ») en 2004. L'IMBES a organisé plusieurs conférences et ateliers, fondé une revue (*Mind, Brain,* and *Education*) permettant l'échange et le dialogue, publiée à partir de 2007 par Blackwell Publishing. Des chercheurs et des praticiens renommés ont déjà soumis articles, rapports et analyses.

Le CERI de l'OCDE, le MBE, l'IMBES et la revue *Mind, Brain, and Education*, avec beaucoup d'autres, cherchent à créer des fondations solides pour la recherche et la pratique éducative. Scientifiques, éducateurs et étudiants témoignent d'un intérêt prometteur. Il est essentiel de créer une infrastructure capable de faire le lien entre recherche et pratique. En médecine, ce lien est assuré par les hôpitaux universitaires, dans lesquels chercheurs et praticiens collaborent et mènent à bien des recherches utiles à la pratique et à la formation de jeunes spécialistes. Il faut à l'éducation des lieux semblables, afin de faire pénétrer la recherche dans les écoles, et la pratique dans les laboratoires. Le MBE et l'IMBES, en collaboration avec l'institut Ross, pensent que l'éducation a besoin d'écoles de recherche, où recherche et pratique seront réunies afin de développer des infrastructures permettant d'asseoir les bases théoriques de l'éducation.

Source : Kurt W. Fischer, Mind, Brain, and Education, Harvard Graduate School of Education.

recherches sur le cerveau – très chères à réaliser – sur des mesures psychologiques peu coûteuses permettrait aux chercheurs de travailler sur des données issues d'un panel beaucoup plus large. Enfin, il importe de se mettre d'accord sur la façon d'évaluer sujets d'études et résultats obtenus, en répondant à des questions telles que celles-ci : selon quels critères décide-t-on qu'une étude mérite d'être menée ? Qu'est-ce qui permet de dire qu'une intervention est couronnée de succès ? Quelle importance accorder respectivement à un résultat statistiquement significatif obtenu en laboratoire et à un effet observé dans les classes ? Neuroscientifiques et éducateurs doivent se mettre d'accord.

Encadré 7.2. **Le Centre pour les neurosciences dans l'éducation : Université de Cambridge, Royaume-Uni**

L'université de Cambridge est un haut lieu de la neuroscience fondamentale et clinique; elle constitue, avec le Addenbrookes Hospital, une référence mondiale dans le domaine. En 2005, l'ouverture du Centre pour les neurosciences dans l'éducation (« Centre for Neuroscience in Education ») a permis un nouvelle percée; c'est le premier endroit au monde où une faculté d'éducation dispose de matériel de neuroimagerie.

Le Centre a pour but de développer l'expertise scientifique dans ce domaine relativement nouveau, d'améliorer les capacités de recherche en formant les chercheurs à appliquer les techniques neuroscientifiques aux questions éducatives, d'informer enseignants et éducateurs, et de faire connaître les conséquences possibles des travaux entrepris. Le fait que le Centre fasse partie du département d'éducation de l'université de Cambridge facilite la diffusion de l'information aux chercheurs en éducation, aux futurs enseignants et aux étudiants, et – c'est très important – permet que les enseignants et les étudiants aident à la formulation des questions à traiter. En 2005, le Centre a hébergé un atelier organisé par le CERI de l'OCDE dans le cadre de son « Projet cerveau », à propos de l'apprentissage de la lecture dans des langues transparentes et non transparentes (voir le chapitre 4).

Le Centre dispose actuellement d'un budget de 1.6 million de livres sterling (issu de l'ESRC [2 subventions], du MRC, de l'EU Framework VI [2 subventions], et du Healthcare Trust). Parmi les projets en cours, on compte une étude diachronique à grande échelle sur les fondements cérébraux de la dyslexie (dirigée par Usha Goswami), des études par échantillonnage sur la dyscalculie et le développement numérique typique chez les enfants (dirigées par Denes Szucs), des études sur la métacognition et le contrôle exécutif chez les très jeunes enfants (dirigées par David Whitebread), et des études sur des enfants atteints de synesthésie, dont le sens des lettres et des nombres fait appel à plusieurs systèmes sensoriels (dirigées par Usha Goswami). Le Centre attire déjà des étudiants et des chercheurs de premier plan, dont un ESRC Research Fellow, un EU Framework VI Research Fellow, un Fulbright Fellow du gouvernement espagnol, un ESRC studentship, un NSF Visiting Research Student, un Gates scholar, un Research Student du gouvernement chilien, et un Research Student taïwanais. Actuellement, seize personnes travaillent au Centre.

Les chercheurs du Centre ont déjà été consultés par les décideurs politiques et les utilisateurs à propos de l'impact potentiel de la neuroscience sur l'éducation : au Royaume-Uni, l'*Office for Standards in Education*, l'*Office for Science and Innovation*, des collectivités locales (LARCI), *Her Majesty's Inspectorate for Education* (Écosse), ainsi que le *Rose Review of the Early Teaching of Literacy*, le *Government Working Group on Learning* convoqué par le ministre de l'Éducation, et le *Football Association Youth Training Scheme ;* parmi les utilisateurs, on trouve des services publics et des associations (*Cambridge Primary Headteachers*, *Cambridge Secondary Headteachers*, *Cambridge Child and Adolescent Mental Health Services*, *Dyslexia Scotland*, *National Association of Teachers of Children with Specific Learning Difficulties*, *National Association of Educational Psychologists*, *Special Schools Deputies Annual Conference*, *Psychology for Learning and Teaching*, et le *Curriculum, Evaluation and Management Centre* de l'université de Durham).

Source : Centre for Neuroscience in Education, Université de Cambridge, Royaume-Uni.

Contributions réciproques de part et d'autre : progrès bidirectionnel

La neuroscience seule ne peut pas fournir les connaissances nécessaires à l'élaboration de méthodes didactiques efficaces. La neuroscience de l'éducation ne peut donc pas se contenter d'intégrer dans les salles de classe les techniques issues de la

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Encadré 7.3. **Learning Lab Denmark**

Le Learning Lab Denmark (LLD) fait partie de l'université de l'éducation danoise. Le LLD a pour objectif premier de mener des recherches interdisciplinaire et orientées vers la pratique sur les processus d'apprentissage dans des contextes formels et informels, ce qui peut faciliter la mise au point de nouvelles méthodes d'enseignement et d'apprentissage. Le LLD se concentre sur la neuroscience et l'apprentissage, domaine sur lequel travaillent les membres de l'équipe « Neuroscience, corporalité et apprentissage ». Cette équipe cherche d'abord à comprendre les relations entre cerveau, corps et cognition ainsi que les théories d'apprentissage capables d'intégrer des découvertes réalisées par la biologie évolutionnaire, la neuroscience et les sciences cognitives. Parmi les projets en cours, on peut citer :

Savoir tacite et implicite : La neuroscience comprend de mieux en mieux les mécanismes sous-jacents à l'apprentissage. Ainsi, on distingue deux modes d'apprentissage – implicite et explicite – qui ont des buts évolutionnaires différents. Le système éducatif traditionnel ne tient compte que de l'apprentissage explicite, car il débouche sur des connaissances que l'on peut verbaliser. Ce projet du LLD étudie le potentiel de l'apprentissage implicite pour, si possible, suggérer des pratiques éducatives permettant de l'exploiter.

L'aire de reconnaissance visuelle des mots : On ne sait toujours pas exactement si la lecture d'un mot dépend d'un système cérébral spécialisé, qui ne soit pas utilisé pour traiter d'autres stimuli (par exemple la reconnaissance d'objets ou de visages) : l'aire de reconnaissance visuelle des mots ou VWFA. Selon certains, la VWFA n'est activée que par les lettres ou les chaînes de lettres, mais d'autres disent qu'elle réagit tout autant – voire plus – à la vue d'autres types d'objets. Nous sommes en train d'étudier la question en observant par IRMf des sujets normaux effectuant des tâches de traitement de mots et d'images.

Différences individuelles dans la maturation cérébrale : grâce aux progrès des techniques d'imagerie cérébrale non invasives, il est aujourd'hui possible d'étudier l'évolution de la maturation cérébrale chez des enfants d'âge scolaire. Il reste encore beaucoup à découvrir, mais on sait déjà que le cerveau ne cesse de se développer. Les études éclairent aussi les différences de rythme dans le développement chez des enfants du même âge, et il semble que ces différences permettent de prédire l'état des processus cognitifs en développement. Il est possible que la maturation du cerveau de chaque enfant ait des caractéristiques uniques, et que ses capacités soient, au moins en partie, limitées par ces caractéristiques. Le programme de recherche à venir va s'intéresser surtout aux différences individuelles dans les trajectoires de maturation cérébrale, et aux relations entre celles-ci et l'évolution des compétences scolaires.

Afin de diffuser les connaissances sur le fonctionnement cérébral et l'apprentissage auprès des communautés éducatives, nous publions des livres scientifiques grand public, qui expliquent comment utiliser concrètement les découvertes de la neuroscience et de la biologie. Une anthologie sur la neuroscience et la pédagogie est en cours d'impression, et nous préparons un livre sur les « écoles dans la forêt » (classes vertes).

Source : Learning Lab Denmark.

recherche sur le cerveau. Il faut au contraire établir une relation réciproque entre pratique éducative et recherche sur l'apprentissage, similaire à la relation entre médecine et biologie (voir le graphique 7.2). Cela alimentera l'échange continu et bidirectionnel d'informations, nécessaire à une pratique éducative reposant à la fois sur ce qu'on sait du fonctionnement cérébral et sur les éléments concrets dont on dispose. Chercheurs et

Encadré 7.4. **Université de Harvard Graduate School of Education**

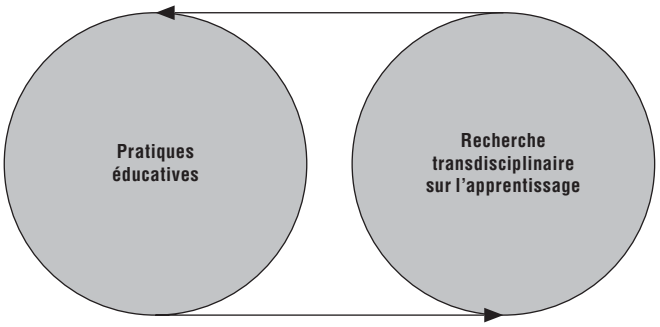
L'étude de l'apprentissage fait aujourd'hui la jonction entre sciences sociales et sciences naturelles. Les récents progrès scientifiques (comme l'apparition des techniques de neuroimagerie) rendent possible une nouvelle approche de l'apprentissage, d'un point de vue biologique. Mais la plus grande part de ce travail se déroule en parallèle à l'étude de l'apprentissage par les sciences sociales, parce que les spécialistes d'un domaine ont du mal à utiliser les connaissances obtenues dans d'autres disciplines que la leur. Il devient donc essentiel de former des professionnels polyvalents capables de transcender les limites de chaque discipline.

C'est précisément le but du programme Esprit, Cerveau et éducation (MBE) de la *Harvard Graduate School of Education*. Depuis bientôt cinq ans, ce programme forme des étudiants à la synthèse entre les différents champs de recherche. Ils travaillent sur la neuroscience, la génétique, la psychologie cognitive et l'éducation, et suivent un cours conçu pour les préparer à effectuer ce travail de synthèse : « Développement cognitif, éducation et cerveau. » Ce cours est assuré par une équipe de spécialistes issus des disciplines concernées qui encouragent les étudiants à réfléchir à l'apprentissage sous de nombreux angles et à utiliser des perspectives variées pour analyser les questions relatives à l'éducation. Une fois diplômés, ils sont à même d'apporter des contributions importantes à la pratique éducative et à la recherche ; Kurt Fischer, le responsable du programme, tient beaucoup à l'échange entre théorie et pratique. Il s'agit là d'un excellent modèle pour d'autres institutions souhaitant mettre en place des programmes transdisciplinaires.

Source : Christina Hinton, diplômée du programme Mind, Brain and Education, Harvard Graduate School of Education.

praticiens peuvent collaborer pour déterminer des thèmes de recherches pertinents, et réfléchir ensemble sur les implications des résultats obtenus. De plus, une fois que des méthodes éducatives issues de la recherche sur le cerveau sont mises en place, les praticiens doivent toujours en étudier l'efficacité et alimenter le travail des chercheurs en leur rapportant les résultats obtenus en classe.

Graphique 7.2. **Échange bidirectionnel entre recherche et pratique**



Note : Un flux d'information bidirectionnel doit couler entre la recherche transdisciplinaire sur l'apprentissage et la pratique éducative. Les découvertes scientifiques influencent la pratique, et les résultats concrets, à leur tour, permettent de fixer les buts de la recherche.

Les praticiens, pour interpréter correctement les découvertes de la neuroscience, et pour pouvoir transmettre leurs observations aux scientifiques, doivent avoir certaines connaissances sur le cerveau et son fonctionnement (voir encadré 7.5). Il faut donc créer

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Encadré 7.5. **Le point de vue des éducateurs sur le rôle de la neuroscience dans l'éducation**

Les praticiens ont un rôle fondamental à jouer dans l'élaboration d'une didactique informée par les connaissances sur le cerveau : ils sont les mieux placés pour en évaluer l'efficacité *in vivo*. Pour collaborer, les disciplines ont besoin de comprendre les attentes, les besoins, les idées, les attitudes des éducateurs. Une étude novatrice menée par Susan J. Pickering et Paul Howard-Jones à l'université de Bristol apporte un éclairage très utile sur la façon dont les éducateurs conçoivent l'union de la neuroscience et de l'éducation.

198 participants (britanniques et d'outre-mer) ont rempli un questionnaire pour cerner ce qu'ils pensaient, croyaient et savaient à propos du lien entre neuroscience et éducation. Quelques-uns ont de plus participé à un entretien semi structuré, qui partait du questionnaire pour leur permettre de développer les sujets qui leur tenaient à cœur. Les participants étaient issus de la conférence *Learning and Brain Europe* (Manchester, 2005), de la conférence *Education and Brain Research* (Cambridge, 2005) et du site *Cerveau et apprentissage* du CERI de l'OCDE.

Le questionnaire comportait des questions demandant une réponse courte, des questions ouvertes, et des questions de type Lickert, et cherchait à déterminer :

- L'opinion des éducateurs sur l'importance de connaître le fonctionnement du cerveau pour une série d'activités éducatives pour enfants et pour adultes.
- Les sources qu'ils utilisent pour obtenir des informations sur la neuroscience et l'éducation.
- Leurs idées pédagogiques en rapport avec le cerveau.
- Si les institutions avec lesquelles ils travaillent ont appliqué des idées venues de la recherche sur le cerveau, et si cela a été efficace.
- L'importance de certains éléments liés à l'application de la neuroscience dans le champ éducatif, comme : la communication entre les parties concernées, la pertinence et l'accessibilité de l'information, et l'éthique.

Les données obtenues sont riches. Parmi les plus notables, on trouve :

- Les éducateurs pensent que l'information sur le cerveau est très pertinente pour un grand nombre d'activités éducatives, dont la conception et l'application de programmes éducatifs pour enfants et adultes – touchés ou non par des troubles de l'apprentissage – et la conscience du rôle de la nutrition dans la réussite académique.
- Ils utilisent une large gamme de sources d'information sur le cerveau : revues académiques, conférences, revues professionnelles, livres, formation continue. Les différences quant à la source préférée peuvent être liées à des questions d'accessibilité, d'habitude, et d'idées préexistantes quant au rôle de la neuroscience dans l'éducation.
- Beaucoup d'idées sur le cerveau et l'éducation sont présentes dans les communautés éducatives. Ces idées vont de faits scientifiquement établis (la théorie des intelligences multiples) aux neuromythes (cerveau gauche/cerveau droit). Les participants sont globalement convaincus de l'utilité des notions auxquelles ils ont été confrontés.
- Les praticiens s'intéressent surtout aux résultats qui sont directement utiles à leur pratique, et moins aux développements théoriques encore inutilisables. Mais ils ne se contentent pas de s'entendre dire « ce qui marche »; ils veulent comprendre pourquoi et comment.
- Ils disent manquer de temps et avoir un accès limité aux sources d'information tels que les revues universitaires. Ils se sentent impuissants face aux « spécialistes ». Ils proposent comme solutions : former des professionnels polyvalents capables de faciliter la communication interdisciplinaire, intégrer la neuroscience à la formation des enseignants, et faire en sorte de les aider à acquérir les capacités pour réfléchir par eux-mêmes aux pratiques pédagogiques issues des connaissances neuroscientifiques.

Cette étude révèle un enthousiasme très encourageant de la part des éducateurs. Ceux-ci désirent comprendre le fonctionnement du cerveau afin d'améliorer leur pratique.

Source : Paul Howard-Jones et Susan J. Pickering, Université de Bristol.

des structures destinées à former les praticiens : formation initiale et continue, et initiatives visant à informer la société civile. Les programmes interdisciplinaires de « neuroscience et éducation » des universités de Harvard, Cambridge et Dartmouth sont des exemples de ce qu'on peut faire pour former des spécialistes transdisciplinaires. On peut aussi intégrer une formation sur le cerveau à des programmes plus traditionnels. Il est par exemple possible de mettre au point une évolution transdisciplinaire à l'intérieur d'un programme de formation : des systèmes moléculaires aux systèmes cellulaires, puis cérébraux, puis individuels, puis sociaux. Cela aurait pour avantage d'insister sur les liens entre cerveau et société et de mettre en évidence le processus itératif par lequel la société modèle les structures cérébrales, et donc influence les comportements qui, en retour, influencent la société. Il serait prudent d'y inclure des éléments permettant de motiver les étudiants et de créer des attitudes positives afin que les connaissances soient imprégnées de pratique concrète. Ces programmes pourraient aussi aider les praticiens à élaborer des progressions destinées à transmettre aux apprenants des connaissances sur le cerveau; on aboutirait ainsi à une conscience métacognitive du processus d'apprentissage.

En raison des progrès rapides de la neuroscience, tout programme éducatif sur le sujet devrait former les gens à poursuivre leur apprentissage de manière autonome, et leur indiquer où trouver des informations fiables. Il faudrait également mettre les praticiens en garde contre les neuromythes, et leur apprendre à exercer leur esprit critique face à ce qu'en disent les médias. Internet permettrait de toucher la société civile plus largement (voir l'encadré 7.6). Des outils créés par le CERI sont disponibles en ligne, dont une base de données et un forum de discussion (*www.ceri-forums.org/forums*).

La neuroscience développe des cadres théoriques de travail, puis des pratiques en sont tirées; il faut absolument que les praticiens en étudient l'application, car les résultats observés dans les classes fournissent des données capitales qui permettent d'améliorer les modèles théoriques. Si une intervention est efficace dans un contexte, mais pas dans un autre, cela éclaire sa relation au problème qu'elle doit traiter, et entraîne la formulation de nouvelles questions à étudier : Quels sont les éléments de l'intervention qui font que cela fonctionne ? Comment adapter le modèle pour résoudre d'autres problèmes proches, mais différents ? Considérons par exemple une technique qui permet d'aider seulement une partie des enfants souffrant de ADHD (« Attention Deficit Hyperactivity Disorder » : trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité) à améliorer leurs capacités d'attention. Si l'on identifie les conditions qui font que cette technique est efficace, les chercheurs peuvent ensuite mieux comprendre les différents types d'ADHD. Les praticiens ont à leur disposition différents moyens de regrouper les données : tenir un journal informel, avoir des discussions semi formalisées avec leurs collègues pour analyser leurs expériences, et publier des textes de réflexion.

Au sein des structures traditionnelles, les praticiens ont du mal à se tenir au courant des résultats scientifiques, et les chercheurs à connaître les résultats *in vivo*. Conférences transdisciplinaires, revues et associations permettent d'y remédier en partie, mais la solution idéale serait de fusionner autant que possible écoles et laboratoires. Le Centre de transfert pour la neuroscience et l'apprentissage (ZNL) de Ulm est l'une des premières avancées dans ce sens (voir l'encadré 7.7). La création de lieux où pratique éducative et recherche sont intimement liées semble une excellente façon de stabiliser le travail transdisciplinaire.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Encadré 7.6. **Technologie et éducation : une perspective mondiale**

Les récentes découvertes sur les mécanismes cérébraux de l'attention, de la numératie et de la littératie ont conduit un certain nombre de chercheurs, encadrés par le Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement (CERI) de l'OCDE, à créer un site Internet, *www.teach-the-brain.org*. Il a pour but de favoriser le développement d'expériences d'enseignement fondées sur la recherche neuroscientifique.

Jusqu'ici, deux programmes ont été conçus pour Internet, l'un destiné à développer l'attention et l'autre la littératie. Ils doivent pour l'instant être téléchargés. Le but final est de créer des logiciels totalement interactifs, utiles à ceux qui s'en servent et permettant en retour de réunir des données sur leur utilisation. Ils pourront ainsi nourrir la recherche, ce qui permettra ensuite de les améliorer.

Des études ont montré que ces programmes permettent d'améliorer et de modifier certains aspects du fonctionnement cérébral, mais ils ne sont cependant pas parfaits. On compte utiliser le site pour informer les gens sur la nature de la recherche et les liens qu'elle entretient avec les programmes eux-mêmes. Plusieurs logiciels similaires sont disponibles à la vente. Nous avons voulu en fournir les liens, quand c'était possible et pour ceux dont l'efficacité était démontrée. Nous souhaitons aussi faire naître des discussions à propos de ceux qui n'ont pas encore été testés, ou qui ne semblent pas tenir leurs promesses commerciales.

De nombreuses applications de la recherche sur le cerveau concernent l'éducation des jeunes enfants – jusqu'à l'école maternelle –, mais d'autres s'intéressent au développement des compétences chez les enfants plus âgés. Ainsi, on s'est intéressé au développement du système de reconnaissance visuelle des mots chez les enfants de 4 à 10 ans. Il semble que ce système commence à se développer assez tard, à partir d'un réseau qui opère surtout sur les mots familiers et selon les règles de l'orthographe anglaise. De telles études aident à déterminer quelle méthode est la plus efficace pour apprendre à lire. D'autres compétences (la perception visuelle d'objets, par exemple) semblent aussi se développer dans des systèmes d'abord utilisés pour traiter d'autres stimuli. La recherche va sans doute permettre d'accéder à une grande maîtrise de concepts complexes. Les techniques d'imagerie cérébrale pourraient nous aider à savoir en quoi une pratique donnée influence telle ou telle partie du réseau cérébral correspondant.

On peut raisonnablement attendre du site Internet qu'il synthétise les exercices de lecture, d'attention et de numératie pour améliorer la connaissance scientifique – évaluation des résultats, lecture des graphiques et des formules mathématiques, et compréhension des communications scientifiques. Un accord se forme sur le fait qu'une telle connaissance est d'importance capitale pour le développement d'une force de travail globale au XXIème siècle. Aider les enfants de tous les pays à acquérir les connaissances nécessaires de la manière la plus efficace possible pourrait représenter un objectif digne d'intérêt pour les programmes scolaires.

Source : Michael I. Posner, Université de l'Oregon, États-Unis.

Encadré 7.7. **Le Centre de transfert pour la neuroscience et l'apprentissage (ZNL), Ulm, Allemagne**

En grande partie, la neuroscience concerne l'apprentissage. Mieux nous savons comment le cerveau apprend, mieux nous pouvons améliorer l'apprentissage dans tous les contextes (écoles maternelles, primaires, enseignement secondaire, formations professionnelles, universités et apprentissage tout au long de la vie). On comprend bien l'importance de la neuroscience pour l'éducation, mais les résultats obtenus en laboratoire ne peuvent pas être immédiatement appliqués en classe; certaines étapes intermédiaires sont incontournables. Le Centre de transfert pour la neuroscience et l'apprentissage (ZNL) a été fondé en 2004 afin de travailler sur ces étapes, et de relier les connaissances neuroscientifiques à la façon dont on apprend et dont on enseigne.

Au ZNL, une équipe multidisciplinaire (psychologues, spécialistes de l'éducation, médecins, biochimistes et linguistes) s'occupent du transfert des connaissances vers les praticiens. La « science du transfert » n'étant pas une discipline officielle, nous abordons la question à de multiples niveaux, en prenant en compte des aspects très divers de l'apprentissage et de l'enseignement. Parmi nos sujets d'étude, on peut citer :

La dyslexie

En quoi enfants et adultes dyslexiques diffèrent-ils des autres? Existe-t-il des marqueurs décelables très tôt dans la vie? Quel est le traitement le plus efficace? Nous avons mis au point le projet CASPAR (pour « Computer Assisted Speech Assessment and Remediation », évaluation et remédiation de la parole assistées par ordinateur). Il s'agit d'une application Internet destinée à identifier les risques chez les enfants d'âge pré-scolaire, et qui propose des jeux permettant de diminuer l'importance des symptômes.

Activité physique et apprentissage

L'activité physique favorise le bon fonctionnement du cerveau. Quel type d'intervention (d'activité physique) a le meilleur impact sur l'attention et l'apprentissage? à l'école primaire? dans les lycées techniques? Nous testons l'efficacité de programmes scolaires cherchant à intégrer l'activité physique dans la journée de cours.

Émotion et apprentissage

L'une de nos études a déjà montré l'importance des émotions dans le processus d'apprentissage. Nous approfondissons maintenant le sujet avec des études par IRMf sur la régulation des émotions. Nous utilisons des mesures du rythme cardiaque pour mieux connaître les émotions des écoliers et les conséquences qu'elles ont.

Apprentissage et mémoire

Beaucoup de professeurs considèrent l'enseignement multi-modal comme la meilleure approche. Nous l'étudions grâce à des techniques de neurophysiologie afin d'en comprendre les fondements scientifiques. De plus, nous étudions son fonctionnement et ses conséquences *in vivo*.

Consolidation de la mémoire

La consolidation de la mémoire est un sujet très important pour l'école. L'IRMf nous permet d'étudier les aspects neurophysiologiques. Quels effets a chaque activité pratiquée à l'école sur la consolidation de la mémoire?

Nutrition et apprentissage

La nutrition influe concrètement, physiologiquement, sur le cerveau, donc sur la pensée et l'apprentissage. Des données empiriques indiquent que beaucoup d'élèves ne prennent pas de petit-déjeuner et ont un régime alimentaire non adapté. Nous étudions les effets de la prise ou non de petit-déjeuner, ainsi que des acides gras (« oméga-3 »), sur l'attention et l'apprentissage.

Source : ZNL (Centre de transfert pour la neuroscience et l'apprentissage), Ulm, Allemagne.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Au-delà des frontières nationales : pour des initiatives internationales

Le lecteur a peut-être remarqué que les initiatives transdisciplinaires et bidirectionnelles évoquées jusqu'ici sont surtout des actions nationales, qui sont en effet une étape essentielle à l'établissement de la neuroscience de l'éducation. Elles sont tellement actives qu'il faut à présent penser à dépasser les frontières pour développer des réseaux internationaux. Ils auraient trois avantages : pour commencer, chaque pays pourrait progresser grâce aux travaux des autres, d'autant plus que chaque programme comporte des chercheurs venus d'horizons différents, travaillant dans des cadres différents, et dans des optiques différentes. Une telle richesse, si elle était systématiquement partagée, profiterait à tous. Ensuite, cela permettrait aux avancées individuelles de ne pas se contenter de ce que les autres ont à lui apporter, mais plutôt de participer à une réflexion commune débouchant sur la naissance d'idées nouvelles et de modèles originaux. Enfin, cela stimulerait le débat sur les questions éthiques qui, si elles doivent au bout du compte être tranchées par les lois de chaque pays, gagneraient à être approfondies par un grand nombre de gens et qui, d'un point de vue philosophique, doivent être envisagées par l'humanité entière.

La neuroscience de l'éducation ne peut pas déboucher sur une pédagogie universelle et prescriptive; elle peut en revanche servir à éclairer l'élaboration de pédagogies adaptées à chaque contexte culturel. Les priorités ne sont pas forcément les mêmes partout, et les résultats obtenus peuvent être interprétés différemment selon les cultures. De plus, toutes les conclusions ne sont pas applicables à toutes les cultures. C'est même le cas pour la dyslexie, dont les manifestations varient selon la structure orthographique de chaque langue (voir chapitre 4). Il est donc nécessaire de mener les recherches dans plusieurs pays pour vérifier la transférabilité des résultats. De plus, l'examen des différences interculturelles fournit de précieuses informations sur l'interaction entre gènes et environnement. Études longitudinales et études de cohortes, au niveau international, sont donc d'excellents outils de recherche, et la collaboration d'équipes de différents pays doit être encouragée.

Avec le développement de la recherche transdisciplinaire, on ressent le besoin d'une coordination internationale. Le CERI de l'OCDE l'a assurée jusqu'ici, mais d'autres structures vont devoir le remplacer. Les gouvernements des pays membres peuvent jouer un rôle important au niveau national, comme c'est déjà le cas au Japon et aux Pays-Bas (voir les encadrés 7.8 et 7.9). La formation de réseaux multidisciplinaires solides au sein de

Encadré 7.8. **JST-RISTEX, Japan Science and Technology-Research Institute of Science and Technology for Society, Japon**

Le Research Institute of Science and Technology for Society (RISTEX), créé parce que les études de cohortes sont d'une importance fondamentale pour la compréhension du développement et de vieillissement du cerveau, a intégré en 2004 des études de cohortes à ses programmes lancés en 2001. Sept études de ce type sont en cours :

1. Le « Tokyo Twin Cohort Project » (ToTCoP) : Ce projet a pour but d'étudier les facteurs génétiques et épigénétiques (équivalents à environnementaux) qui affectent le développement : caractère, capacités motrices, compétences linguistiques et cognitives et autres traits comportementaux durant les premières années de la vie. Il repose sur une étude longitudinale étalée sur cinq ans, portant sur des jumeaux (environ 1 000 paires). Il devrait permettre d'élucider l'importance respective des facteurs génétiques et environnementaux, ainsi que de mieux connaître les rapports qui unissent les premiers aux seconds.

Encadré 7.8. **JST-RISTEX, Japan Science and Technology-Research Institute of Science and Technology for Society, Japon** *(suite)*

2. Étude de cohorte sur le spectre autistique : Cette étude porte sur les causes sociales du développement typique ou atypique des enfants. Elle étudie la pathogénie et les variations des manifestations de l'autisme en fonction de données obtenues quant au développement du comportement et aux réseaux neuraux correspondants. On attend de ce projet qu'il aide à repérer les enfants atteints d'un trouble du spectre autistique, à remédier à leurs problèmes, et à mieux comprendre le rôle de l'environnement social; cela contribuerait à résoudre les problèmes qui se posent actuellement dans les écoles.
3. Études de cohortes sur les fonctions cérébrales supérieures chez les seniors « normaux » et les enfants atteints de troubles de l'apprentissage : Le vieillissement de la population, associé au faible taux de fécondité, est un sujet crucial aujourd'hui. Cette étude analyse les méthodes de lutte contre le vieillissement permettant de conserver intactes les fonctions cérébrales des personnes âgées, et les interventions destinées à assurer un bon fonctionnement cérébral chez les enfants atteints de troubles de l'apprentissage.
4. Études de cohortes sur l'acquisition du langage, la spécialisation cérébrale et l'apprentissage des langues : Le but recherché est triple. D'abord, étudier les mécanismes d'acquisition de la langue maternelle et d'une langue étrangère en lien avec la spécialisation cérébrale et la plasticité fonctionnelle. Ensuite, identifier la (ou les) période(s) sensible(s) pour l'acquisition d'une première langue étrangère. Enfin, proposer un programme raisonné pour l'apprentissage d'une langue étrangère à l'école – principalement l'anglais –, en indiquant les âges et les contextes optimaux. Pour cela, des études de cohortes ont été menées pendant quatre ans sur trois groupes distincts : *a)* chez des personnes dont la langue maternelle est l'anglais et qui ont appris le japonais, *b)* chez des locuteurs natifs japonais qui ont appris une langue étrangère au Japon, et *c)* chez des enfants de 2 à 5 ans dont la langue maternelle est le japonais.
5. Développement d'un outil bio-médical pour la santé mentale des étudiants : Il s'agit de mettre au point un nouvel outil bio-médical permettant d'évaluer les réactions de stress de manière simple et objective grâce à une analyse à haut débit de l'expression des gènes par micro-array, ce qui a l'avantage de permettre d'étudier les réactions complexes au stress.
6. Études de cohorte sur la motivation et l'efficacité de l'apprentissage par neuroimagerie fonctionnelle. Cette étude explore les mécanismes cérébraux liés à la motivation chez les enfants et les adultes, grâce à l'IRMf, en mesurant la fatigue ressentie par les sujets durant des tâches d'apprentissage faisant appel à la motivation. Elle s'intéresse également aux aspects génétiques et environnementaux chez les enfants souffrant de troubles de l'apprentissage, afin de déterminer si leur problème vient des mécanismes de motivation. Le but premier est de mettre au point et/ou de proposer des méthodes d'apprentissage efficaces qui assurent un niveau de motivation élevé et limitent la fatigue pendant les processus d'apprentissage.
7. Le Japan Children's Study (JCS) : Cette étude analyse les mécanismes développementaux à l'œuvre dans la « sociabilité » et les « compétences sociales », et identifie les facteurs qui font qu'un environnement est adapté ou non aux bébés et aux enfants. Des études de cohorte vont permettre de tester concrètement les résultats d'expériences scientifiques. Pour commencer, plusieurs groupes seront étudiés en même temps : des bébés à partir de quatre mois, des bébés de cinq mois et plus, par exemple. Cette étude préliminaire portera sur plus de cinq cents enfants et durera plusieurs années. Elle va fournir des informations précieuses pour des études de cohortes ultérieures, à grande échelle.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Encadré 7.8. **JST-RISTEX, Japan Science and Technology-Research Institute of Science and Technology for Society, Japon** *(suite)*

Toutes ces études déboucheront sur trois types de résultats :

- Accumuler des éléments scientifiques à l'intention des décideurs politiques, principalement en matière d'éducation.
- Fournir une évaluation des effets potentiels des nouvelles technologies sur les bébés, les enfants et les adolescents.
- Déterminer dans quelle mesure les hypothèses issues de la recherche génétique et de la recherche sur les animaux sont applicables à l'homme.

Enfin, après que le concept d'évaluation environnementale est apparu dans les années 80, la société s'est rendu compte qu'il faut également l'appliquer à la science et à la technologie. Les grands changements à l'œuvre aujourd'hui pourraient bien entraîner des problèmes sociologiques et psychologiques pour l'homme. Une évaluation environnementale d'un point de vue métaphysique pourrait se révéler nécessaire si nous voulons laisser une société viable aux générations futures.

Source : Hideaki Koizumi, JST-RISTEX.

Encadré 7.9. **La neuroscience de l'éducation aux Pays-Bas**

Fin 2002, le conseil néerlandais des sciences (NWO), en accord avec le ministère néerlandais de l'Éducation, de la Culture et de la Science, a fondé le comité Cerveau et apprentissage, destiné à promouvoir un échange actif entre neuroscientifiques, cogniticiens, chercheurs en sciences de l'éducation et praticiens. Deux réalisations ont alors vu le jour.

La première a été la « Semaine du cerveau et de l'apprentissage », organisée en février 2004 sous le titre « Apprendre à connaître le cerveau ». Quarante-cinq leaders d'opinion ont été invités à la conférence qui constituait le cœur de l'événement; s'y sont ajoutés un colloque réunissant des scientifiques du monde entier, et un colloque destiné aux praticiens et au grand public. La conférence portait sur l'innovation dans l'enseignement *via* neuroscience et science cognitive, et cherchait à identifier les difficultés possibles, les obstacles rencontrés et les buts souhaitables. Les participants – scientifiques, praticiens et représentants de la vie sociale et politique – se sont rencontrés lors d'ateliers et de séances de discussion. Ils se sont mis d'accord sur les prochaines étapes et ont établi un « programme pour l'avenir ». Tous étaient d'accord pour dire ceci : « Le temps d'un échange actif entre les diverses disciplines est venu. »

La seconde réalisation a été, en mai 2005, la publication d'un livre intitulé « Apprendre à connaître le cerveau », qui fait le point sur les conclusions de la conférence sur plusieurs grands sujets : « Différences individuelles », « L'apprentissage à l'adolescence », « Les mathématiques », « Les processus de motivation », « Les processus d'apprentissage » et « L'apprentissage à l'âge adulte ». Il formule également des recommandations pour la poursuite de la réflexion, sous la forme de vingt propositions (téléchargeable depuis *www.jellejolles.nl*).

Le livre et la conférence ont connu un grand retentissement. À l'automne 2006, on a observé des progrès concrets à trois niveaux. Du côté des institutions scientifiques (NWO) et des chercheurs, une « Initiative nationale » sur le cerveau et la cognition, multidisciplinaire et multidimensionnelle, regroupe plusieurs domaines scientifiques. Elle a pour but d'évoluer vers une « Initiative nationale de recherche » (IRN), avec un budget de 290 millions d'euros. L'étude du cerveau, de l'apprentissage et de l'enseignement (« L'esprit qui apprend ») est l'une de ses principales activités aux côtés de « l'esprit sain » et de « l'esprit qui travaille ».

Encadré 7.9. **La neuroscience de l'éducation aux Pays-Bas** *(suite)*

Du côté du ministère de l'Éducation et des institutions concernées par l'enseignement, on a organisé une conférence en juin 2006, dont les conclusions ont abouti à ce que des institutions et des organisations concernées par « le développement et l'innovation dans l'enseignement » s'investissent dans le domaine et réfléchissent aux prochaines étapes.

Enfin, les praticiens travaillent beaucoup sur le sujet : ateliers, conférences, congrès s'organisent dans tout le pays à l'intention des institutions et des organisations d'enseignants. Des pratiques éducatives tirées des découvertes neuroscientifiques ont déjà été mises en place grâce à une collaboration avec l'université.

On peut donc dire qu'aux Pays-Bas, la réflexion sur « Cerveau, apprentissage et éducation » est perçue comme très importante. Nous pensons que les ressources financières nécessaires peuvent être réunies, et que science et enseignement peuvent travailler ensemble. Il est capital que les membres de chaque discipline apprennent à écouter et à comprendre les autres. Les progrès réalisés résultent du projet « Cerveau et sciences de l'apprentissage » du CERI.

Source : Jellemer Jolles, Université de Maastricht, Pays-Bas.

chaque pays peut faciliter la collaboration internationale. La coordination peut être assurée par des sociétés internationales comme la *International Mind, Brain and Education Society* (IMBES) récemment créée (voir l'encadré 7.1).

Précautions et limites

La neuroscience peut fournir un éclairage précieux sur l'apprentissage, mais il importe d'avoir conscience de ses limites. Les enseignants doivent faire preuve de prudence en appliquant en classe des résultats obtenus en laboratoire. À mesure que la neuroscience de l'éducation va se développer, les scientifiques vont probablement modifier leurs protocoles de recherche pour qu'ils soient plus proches de ce qui se passe réellement dans un contexte éducatif complexe. De plus, il faudrait mettre en place des politiques informées par la recherche en testant de manière systématique l'efficacité des modèles proposés. Cet échange entre recherche et pratique assure la validité des méthodes inspirées de la neuroscience.

De plus, toutes les implications des découvertes neuroscientifiques dépendent des valeurs et des buts de chaque communauté. Par exemple, la neuroscience a montré qu'il est sans doute plus efficace d'apprendre une langue étrangère à l'école primaire qu'au collège (voir les chapitres 2 et 4), mais cela ne veut pas dire que toutes les écoles primaires devraient enseigner une langue étrangère. Si on considère qu'il est plus important d'acquérir une autre compétence pendant la même période sensible, on peut préférer enseigner celle-ci. Enfin, le fonctionnement du cerveau n'est que l'un des nombreux facteurs à prendre en compte pour élaborer des programmes et méthodes d'enseignement. La neuroscience est un outil, avec ses forces et ses faiblesses. Elle est très utile pour répondre à certaines questions, mais peu efficace pour d'autres. Ainsi, elle peut dire à quel âge on apprend le plus facilement une langue étrangère, mais elle est assez peu pertinente pour déterminer le choix d'une langue ou d'une autre.

Dans le développement d'une approche transdisciplinaire des politiques éducatives, il est important d'être clair quant aux objectifs poursuivis en utilisant les connaissances neuroscientifiques. Celles-ci ne peuvent générer une approche universelle et prescriptive en

matière de didactique, mais elles peuvent informer la construction de méthodes d'enseignement et de programmes dans différents contextes. Des politiques éducatives informées par la neurobiologie ne peuvent pas être imposées aux écoles – quelle que soit la ligne de recherche retenue, ses implications éducatives doivent entrer dans une interaction synergique avec les communautés éducatives, de manière à développer des politiques adaptées à chaque contexte culturel. Pour cette raison, le savoir neuroscientifique doit être rendu accessible au plus grand nombre de décideurs, de façon à ce qu'ils puissent faire usage de cette information et construire des politiques appropriées à la culture scolaire qui est la leur. L'efficacité des mesures prises, lorsqu'elles auront été mises en œuvre, devra être systématiquement examinée.

Références

Bruer, J. (1993), « Schools for Thought: A Science of Learning in the Classroom », MIT Press.

Calvino, B. (2003), « Les médicaments du cerveau », *Graines de sciences,* vol. 5 (ouvrage collectif), Le Pommier, pp. 111-134.

Gardner, H. (1983), *Frames of Mind: Theory of multiple intelligences*, Basic Books.

Gardner, H. (2000), *Intelligence Reframed: Multiple Intelligences for the 21st Century*, Basic Books.

Guillot, A. (2005), « La bionique », *Graines de sciences,* vol. 7 (ouvrage collectif), Le Pommier, pp. 93-118.

INSERM expertise collective (2005), « Troubles de conduites chez l'enfant et l'adolescent », Éditions INSERM.

Koizumi, H. (1999), « A Practical Approach to Transdisciplinary Studies for the 21st Century – The Centennial of the Discovery of the Radium by the Curies », *J. Seizon & Life Sci.*, vol. 9, pp. 19-20.

Kramer, P.D. (1997), *Listening to Prozac: The Landmark Book about Antidepressants and the Remaking of the Self*, Penguin Books, New York.

OCDE (2002), « Une approche neuroscientifique de l'apprentissage », *Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage*, OCDE, Paris.

OCDE (2004), *Apprendre aujourd'hui, réussir demain : Premiers résultats de PISA 2003*, OCDE, Paris, *www.pisa.oecd.org*.

Talan, J. (2005), « Rethinking What May Look Like a Normal Brain », *www.newsday.com*, 1er février.

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE I

Conclusions et perspectives d'avenir

Il n'est pas bon d'essayer d'empêcher la connaissance d'avancer. L'ignorance n'est jamais préférable à la connaissance.

Enrico Fermi

Ce chapitre, qui conclut la première partie du présent rapport, en rassemble les messages clés et les implications politiques potentielles, montrant en quoi la recherche neuroscientifique contribue d'ores et déjà aux politiques et aux pratiques éducatives en termes d'apprentissages. Les thèmes abordés comprennent : l'apprentissage tout au long de la vie ; le vieillissement ; les approches holistiques en matière éducative ; la nature de l'adolescence ; les âges propices à certaines formes d'apprentissage, en lien avec les programmes ; le traitement des « 3 D » (dyslexie, dyscalculie, et démence) ; et les problèmes relatifs à l'évaluation et à la sélection, dans lesquels la neuroscience pourrait être de plus en plus impliquée. On indique également ici dans quels domaines il apparaît, à la suite des chapitres précédents, que la recherche en neuroscience de l'éducation peut ou doit faire porter ses efforts à venir.

Après sept ans de travail sur une activité aussi novatrice que les sciences de l'apprentissage, il serait tentant d'exagérer les résultats obtenus, et facile de réclamer des recherches plus approfondies avant de formuler des conclusions. Il est vrai, cependant, que de plus amples études sont nécessaires, et des pistes importantes sont suggérées ci-dessous. Il est vrai également que ce chapitre de conclusion cherche à éviter de formuler des recommandations péremptoires. Ce domaine de recherche est encore trop récent et les liens entre la neuroscience et l'enseignement sont trop complexes et incertains pour que cela puisse se justifier. Il est rare que les résultats neuroscientiques, aussi riches et prometteurs soient-ils, permettent de prouver le bien-fondé de pratiques et de politiques particulières. En effet, une des leçons à tirer de notre travail – leçon déjà claire dans le rapport de 2002 (*Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage*) est qu'il faut se méfier des approches simplistes ou réductionnistes, qui, pour plaire aux médias ou sembler rentables, trahissent néanmoins les conclusions scientifiques.

Ce chapitre reprend les grands thèmes et les conclusions de la réflexion qui précède. On peut proposer des idées et des questions à résoudre, qui permettraient de lancer ou de renouveler les débats sur l'évolution de nos systèmes éducatifs. Si nous assistons à la naissance d'une science de l'apprentissage, des idées et des arguments nouveaux apparaîtront rapidement et pourront changer beaucoup de choses. Il n'est cependant pas indispensable d'attendre. L'une des missions du CERI a toujours été d'aider les pays de l'OCDE à réfléchir à l'avenir. Si les conclusions formulées ici sont assez générales, c'est précisément pour créer l'élan nécessaire à l'exploration de l'immense territoire décrit dans les chapitres précédents.

Messages clés et conclusions

> Les plus importantes révolutions scientifiques supposent toutes, et c'est leur seul point commun, de détrôner l'arrogance humaine, de la faire descendre, un piédestal après l'autre, de ses convictions antérieures quant à la place centrale que nous occupons dans le cosmos.
>
> *Stephen Jay Gould*

La neuroscience de l'éducation débouche sur des connaissances précieuses et neuves, qui permettent d'informer politiques et pratiques éducatives.

Cet ouvrage traite une vaste gamme de sujets – de l'apprentissage des bébés à celui des personnes âgées, des connaissances sur un sujet précis à l'étude des émotions et de la motivation, de la remédiation à la compréhension globale des processus d'apprentissage –, ce qui montre la richesse et la variété de ce que la neuroscience peut apporter aux politiques et aux pratiques éducatives. Cette contribution adopte différentes formes.

Sur bien des sujets, *la neuroscience utilise des conclusions déjà établies par d'autres moyens* : études psychologiques, observations *in vivo* ou études de résultats. Les exemples repris dans

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

ce volume – rôle de l'alimentation dans l'amélioration des résultats scolaires, importance de la confiance en soi et de la motivation, etc. – ne sont pas nouveaux. Néanmoins, l'apport de la neuroscience est important même dans des sujets déjà bien connus, car :

- elle permet d'établir la *causalité*, et pas seulement la *corrélation*, et permet de quitter le domaine de l'intuition et de l'idéologie pour celui de la preuve scientifique ;
- elle peut aider à informer des interventions et des solutions efficaces, en explicitant les mécanismes responsables des éléments observés.

Mais sur d'autres sujets, la neuroscience *génère de nouvelles connaissances et ouvre de nouvelles pistes*. Ainsi, connaître le fonctionnement du cerveau est indispensable pour déterminer les différents types d'activation cérébrale apparaissant chez les spécialistes d'un domaine et non chez les novices (ce qui est un moyen d'étudier la compréhension, le savoir-faire et la maîtrise de compétences), ou pour étudier en quoi l'apprentissage peut être une stratégie efficace pour combattre le déclin dû au vieillissement, ou encore pour comprendre pourquoi des troubles de l'apprentissage apparaissent chez des individus qui dans d'autres domaines éducatifs n'ont aucun problème particulier.

Un troisième rôle de la neuroscience est de *dissiper les neuromythes* (voir chapitre 6). Les connaissances distordues sont dangereuses pour les pratiques éducatives sérieuses, auxquelles on risque de préférer des formules à la mode ou des grandes théories aussi fumeuses qu'éphémères.

Parmi les autres contributions importantes de la neuroscience dans le domaine éducatif, on trouve :

- les études qui *approfondissent les connaissances de base sur l'apprentissage* en tant qu'aspect central de la vie humaine et sociale, en transcendant les différentes institutions éducatives ;
- les méthodes permettant de *révéler des particularités non apparentes*, afin de proposer des moyens de remédiation – par exemple pour surmonter des troubles de l'apprentissage de la lecture, ou une dyscalculie. Ces méthodes pourraient aussi permettre de sélectionner les individus, d'améliorer leurs performances ou d'en exclure certains, ce qui soulève de bien épineuses questions éthiques abordées dans le chapitre 7 ;
- la capacité (avec d'autres disciplines) à *éclairer la conception de pratiques éducatives*, surtout en ce qui concerne l'équilibre entre, d'un côté, la meilleure façon d'apprendre et le meilleur moment pour apprendre, et, de l'autre, l'organisation traditionnelle des institutions scolaires. On peut se demander si, aujourd'hui, on tient suffisamment compte de ce qui a été établi à ce sujet.

Les recherches sur le cerveau apportent les preuves neuroscientifiques qui permettent de soutenir la notion d'apprentissage tout au long de la vie, et confirment qu'il est toujours bénéfique d'apprendre, surtout pour des populations vieillissantes.

L'une des principales découvertes dans le domaine de l'apprentissage est la remarquable « plasticité » du cerveau – cette capacité à s'adapter, à évoluer en fonction de l'expérience et des besoins, et à élaguer des éléments devenus inutiles –, qui se maintient durant toute la vie, et jusqu'à un âge bien plus avancé que ce qu'on croyait naguère. Les pressions environnementales sont la clé de la plasticité : plus on apprend, plus on peut apprendre. Loin de soutenir l'idée qu'il faut surtout éduquer les jeunes – même s'il est vrai que ceux-ci disposent d'un fabuleux potentiel d'apprentissage –, la neuroscience a montré que *l'apprentissage se fait tout au long de la vie, et que plus on continue d'apprendre, mieux on continue d'apprendre*.

Le besoin d'éléments de preuves sur lesquels fonder politiques et pratiques se fait plus pressant; il est donc de plus en plus important de bien comprendre les « bénéfices connexes » de l'éducation, au-delà des critères économiques qui dominent si souvent les analyses politiques. Un nombre croissant d'éléments prouvent que la participation à l'apprentissage peut avoir d'importantes conséquences sur la santé ou la participation citoyenne d'une population (voir à ce sujet les travaux du CERI sur « Mesurer les retombées sociales de l'éducation »). Le présent rapport montre l'ensemble des bénéfices qu'apporte l'apprentissage : les problèmes cruciaux, et coûteux, posés par la démence sénile (d'autant plus sensibles dans des pays touchés par le vieillissement de leur population), peuvent être nettement réduits grâce à des techniques d'apprentissage identifiées par la neuroscience.

L'amélioration des diagnostics, la possibilité de pratiquer une activité physique, des traitements médicamenteux adaptés et surveillés, et de bonnes interventions éducatives peuvent, ensemble, nettement favoriser le bien-être global et prévenir le déclin lié à l'âge chez les seniors.

Il nous faut des approches globales prenant en compte l'interdépendance du corps et de l'esprit, de l'émotionnel et du cognitif

Étant donné l'importance accordée aux performances cognitives – à l'intérieur de chaque pays, et à un niveau international –, le risque est grand d'adopter une conception réductrice du rôle de l'école. Prendre conscience de l'importance du cerveau ne veut pas dire qu'on ne s'intéresse plus qu'aux aspects cognitifs et aux performances. Au contraire, cela fait comprendre à quel point il importe d'adopter une approche globale, qui tienne compte des liens étroits entre bien-être physique et intellectuel, aspects émotionnels et cognitifs, esprit analytique et capacités créatrices.

On connaît de mieux en mieux les effets de la nutrition, de l'activité physique et du sommeil sur le cerveau, donc leur influence sur l'apprentissage. Chez les seniors, l'activité cognitive (jouer aux échecs ou faire des mots croisés, par exemple), l'activité physique et le maintien de rapports sociaux favorisent l'apprentissage et peuvent retarder la dégénérescence cérébrale (voir le chapitre 2).

Ce rapport montre non seulement l'importance des émotions pour le fonctionnement cérébral, mais aussi l'influence que chaque émotion exerce sur toutes les autres. Pour l'éducation, il importe surtout d'étudier le stress et la peur (il a été établi que ceux-ci réduisent les capacités analytiques), et de faire comprendre que les émotions positives permettent au cerveau de mieux fonctionner.

C'est vrai aussi bien pour des apprenants adultes, mal à l'aise de « retourner sur les bancs de l'école », que pour des jeunes qui arrivent dans le secondaire ou à l'université et ont du mal à s'adapter. Ces sujets touchent aux questions de justice sociale et d'équité, car la peur d'échouer, le manque de confiance en soi et des problèmes comme « l'anxiété mathématique » (voir chapitres 3 et 5) ont plus de chance de toucher des apprenants issus des milieux moins favorisés.

Il nous faut mieux comprendre l'adolescence : la puissance est là, mais pas le contrôle

Ce rapport montre ce qu'est l'adolescence du point de vue du développement cérébral, et surtout de la maturation émotionnelle.

L'apport de la neuroscience sur l'étude de l'adolescence est particulièrement important, car cette période est cruciale sur le plan éducatif. C'est à l'adolescence que l'on

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

fréquente l'enseignement secondaire, période à laquelle on doit prendre des décisions fondamentales dont les conséquences (personnelles, éducatives et professionnelles) seront très lourdes. C'est un âge où les capacités cognitives sont certes bien développées (« la puissance est là »), mais où les individus n'ont pas encore atteint la maturité émotionnelle (« mais pas le contrôle »).

On ne doit certes pas en conclure qu'il faut attendre l'âge adulte pour prendre ces décisions. En revanche, il serait important que les choix effectués ne soient pas définitifs et puissent être modulés plus tard. Il faut mieux déterminer les différentes occasions d'apprentissage ultérieur (formelles et informelles) et mieux identifier les trajectoires de maturation à l'adolescence.

La neuroscience a également développé le concept de « régulation émotionnelle ». Pour apprendre efficacement, il faut savoir gérer ses émotions. La régulation émotionnelle recouvre des éléments complexes tels que les capacités d'attention, de résolution de problèmes et d'établissement de relations sociales. Étant donné que les adolescents contrôlent mal leurs émotions, et qu'il importe de favoriser leur maturation émotionnelle, il pourrait être judicieux de réfléchir à l'introduction de la régulation émotionnelle dans les programmes scolaires.

Il nous faut considérer le facteur temps et la périodicité lorsque l'on traite de programmes

Les travaux de psychologues comme Piaget ont durablement influencé notre conception de l'apprentissage et du développement individuel. La neuroscience de l'éducation permet aujourd'hui de préciser les modèles de Piaget (y compris de mettre en évidence les capacités dont les bébés disposent déjà), tout en aidant à mieux comprendre l'importance du facteur temps grâce à l'étude des périodes « sensibles ».

Le message exprimé dans ce rapport est nuancé : il n'existe pas de « périodes critiques » durant lesquelles un apprentissage donné *doit* absolument intervenir, et d'ailleurs la notion de « plasticité » tout au long de la vie indique qu'on peut apprendre à tout âge ; en revanche, on connaît mieux les caractéristiques des périodes dites « sensibles », et les âges auxquels un individu est particulièrement réceptif à telle ou telle activité d'apprentissage.

Nous nous sommes surtout occupés de l'exemple des apprentissages langagiers, car ce sujet est fondamental dans des sociétés de plus en plus tournées vers l'extérieur. En règle générale, plus tôt on commence à apprendre une langue étrangère, plus efficace sera l'apprentissage. L'activité cérébrale déclenchée par cet apprentissage n'est pas la même chez les bébés, chez les enfants et chez les adultes : globalement, plus on vieillit, plus le nombre d'aires cérébrales impliquées augmente, et moins l'apprentissage est efficace. Cela dit, les adultes sont malgré tout parfaitement capables d'apprendre une langue étrangère.

Ce rapport a également dissipé le mythe aux termes duquel l'apprentissage de langues étrangères serait nocif à la maîtrise de la langue maternelle. En effet, un enfant qui apprend une autre langue améliore aussi ses compétences dans sa langue maternelle.

Ces questions sont importantes pour l'éducation. Les découvertes qu'elles ont suscitées permettent d'éclairer la réflexion sur les meilleurs moments pour entreprendre certains apprentissages, en fondant celle-ci sur la science et non sur la tradition. Elles montrent d'autre part qu'il est très important de disposer de bases solides pour l'apprentissage tout au long de la vie : l'éducation des jeunes enfants et la maîtrise des compétences de base ne sont donc pas seulement des fins en soi, mais représentent un investissement pour l'avenir.

Parallèlement, ce rapport montre qu'il est dangereux de surestimer l'influence des trois premières années de vie sur l'apprentissage ultérieur (voir chapitre 6).

La neuroscience peut constituer un apport crucial aux grands défis auxquels l'éducation est confrontée

C'est en ce qui concerne les « 3 D » – dyslexie, dyscalculie, démence – que les apports de la neuroscience pour le diagnostic et l'élaboration de techniques de remédiation sont les plus visibles.

Dyslexie : jusqu'à une époque récente, on ne connaissait pas l'origine de la dyslexie. On sait aujourd'hui qu'elle est principalement due à une atypie du cortex auditif (ou, parfois peut-être, du cortex visuel). On peut à présent identifier les caractéristiques de la dyslexie chez de très jeunes enfants. La remédiation est souvent d'autant plus efficace que l'enfant est jeune, mais elle reste possible chez les individus plus âgés.

Dyscalculie : on sait à présent que ses causes sont comparables à celles de la dyslexie, mais les diagnostics précoces sont moins développés, et les interventions se font donc plus tard.

Démence : nous avons déjà cité les découvertes fondamentales concernant les liens entre démence et apprentissage. Ce dernier est clairement identifié comme un moyen efficace de « prévention » qui permet entre autres de retarder l'apparition des symptômes de la maladie d'Alzheimer, et d'en diminuer la gravité.

Plus généralement, en ce qui concerne la littératie (voir chapitre 4), l'importance simultanée du traitement phonologique et du traitement sémantique direct lors de la lecture en anglais permet de supposer qu'une méthode mixte est la plus adaptée pour apprendre à lire dans des langues alphabétiques non transparentes. Pour les langues transparentes, la neuroscience semble confirmer que les « méthodes syllabiques » sont les plus adaptées. Il sera intéressant de comparer les processus d'acquisition de la lecture entre langues alphabétiques et non-alphabétiques.

Quant à la numératie (voir chapitre 5), les hommes ayant une tendance innée à comprendre le monde en termes mathématiques, l'enseignement devrait utiliser le sens informel des nombres pour construire des compétences plus complexes. Nombres et espace sont étroitement liés au niveau cérébral; les méthodes pédagogiques qui unissent nombres et espace sont donc très efficaces.

Une évaluation plus personnalisée pour améliorer l'apprentissage, non pour sélectionner et exclure

Dans le domaine éducatif, le potentiel des techniques d'imagerie cérébrale est immense, mais pose aussi des questions éthiques très importantes. Les connaissances sur le fonctionnement du cerveau, et sur les manifestations physiologiques des compétences et des savoir-faire, peuvent être utilisées au niveau des institutions pour réfléchir aux pratiques éducatives traditionnelles et chercher à les optimiser. La plupart des méthodes d'évaluation, qui permettent de réussir par le bachotage, ne sont pas adaptées au fonctionnement réel du cerveau, et sont inefficaces à moyen et long terme.

Mais, d'une manière moins générale, les découvertes neuroscientifiques pourraient aussi être appliquées au niveau de l'individu : pour déterminer par exemple si un élève a réellement compris un sujet, ou pour évaluer son niveau de motivation ou d'anxiété. Bien utilisée, cette possibilité offrirait un outil de diagnostic très précieux lors d'évaluations formatives (OCDE, 2005) et pour l'apprentissage personnalisé.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

À ce sujet, on doit noter que beaucoup de pays cherchent à « personnaliser » programmes et pratiques éducatives (OCDE, 2006). La neuroimagerie peut grandement faciliter cette personnalisation. Dans le même temps, des études montrent que les caractéristiques individuelles sont loin d'être « fixées » : l'interaction entre génétique, expérience et plasticité est permanente, et la notion de « capacités » chez un individu doit être envisagée avec précaution.

Cela dit, les applications individuelles de la neuroimagerie peuvent déboucher sur des techniques de sélection et d'exclusion plus puissantes que celles que nous connaissons aujourd'hui. Un « CV biologique » serait très dangereux – et très tentant pour les universités ou les employeurs. Il s'agirait d'un vrai détournement d'un outil utile et précieux, dont l'usage à des fins non souhaitables permettrait de refuser des élèves ou des candidats dont le « potentiel » serait jugé insuffisant (alors même que la plasticité cérébrale montre combien les capacités d'apprentissage peuvent se développer). Une conception trop étroitement scientifique de l'éducation, telle que décrite au chapitre 7, utilisée pour sélectionner étudiants et enseignants, serait pour beaucoup de gens une véritable catastrophe.

Les grands thèmes de recherche à venir

> Si nous accordons quelque valeur à la recherche de la connaissance, nous devons être libres d'aller jusqu'au bout, où que cette quête nous mène.
>
> *Adlai E. Stevenson Jr.*

Nous ne prétendons pas que les domaines cités ci-dessous soient exhaustifs; mais l'analyse de notre rapport a permis de les définir comme questions prioritaires. Certains sont encore très peu étudiés et ont grand besoin d'être approfondis.

Il s'agit également d'établir un programme de recherche portant sur l'éducation, et non plus seulement sur des aspects médicaux (qui jusqu'ici ont naturellement été les plus abondamment traités). La communauté neuroscientifique doit comprendre combien elle peut éclairer l'apprentissage et l'éducation, domaines qui nous concernent tous, du plus au moins performant, du bébé au très vieux monsieur.

- Mieux connaître les périodes les plus appropriées à chaque forme d'apprentissage, surtout pour des adolescents ou des adultes dont les connaissances de base ne sont pas assez solides (voir le tableau du chapitre 2). Cela inclut les « périodes sensibles » durant lesquelles la capacité d'apprentissage est à son apogée, dans des domaines précis comme l'apprentissage langagier.
- Comprendre l'interaction entre augmentation des connaissances et diminution des fonctions exécutives et de la mémoire. Mieux étudier le processus de vieillissement, non seulement chez les personnes âgées mais aussi chez les adultes, à la fois quant à la capacité d'apprentissage et quant au rôle de l'apprentissage pour retarder les effets indésirables du vieillissement.
- Mieux connaître les émotions présentes dans le cerveau. Des études psychologiques et par neuroimagerie permettraient d'étudier les mécanismes neurobiologiques liés à l'impact du stress sur l'apprentissage et la mémoire, et les facteurs permettant de le réduire ou de le supprimer. Il serait bon d'étudier précisément la façon dont le cerveau émotionnel des adolescents interagit avec différents types d'environnement et de salles de classe.

- Mieux comprendre en quoi les conditions de laboratoire influencent les résultats obtenus, ainsi que l'applicabilité et la transférabilité des résultats dans des conditions autres que celles de départ. Il faut analyser de manière fine le rôle et l'importance d'un matériel pédagogique et d'un environnement adaptés, de façon à mettre fin aux interrogations binaires ou simplistes (« L'environnement a-t-il ou non une influence sur l'apprentissage? »)
- Continuer à étudier en quoi un régime alimentaire adapté favorise un bon développement cérébral; poursuivre les études portant directement sur le domaine éducatif. De même pour l'activité physique, le sommeil, la musique et l'expression artistique et créative.
- Beaucoup plus étudier quels types d'apprentissage nécessitent une interaction sociale, et s'intéresser davantage à l'importance des différences culturelles. Cette question peut être subdivisée ainsi : différences démographiques (surtout en fonction du sexe des apprenants) et différences socioculturelles. C'est potentiellement très dangereux, et la neuroscience ne doit surtout pas servir à justifier des stéréotypes racistes ou sexistes.
- Éclairer des itinéraires multi-dimensionnels débouchant sur la même compétence par des chemins différents (pour la lecture par exemple). Il faut pour cela étudier les situations d'apprentissage réelles, c'est-à-dire s'intéresser à la lecture de phrases complètes et non de mots isolés, voire de lettres.
- Poursuivre la cartographie des mathématiques au niveau cérébral, qui repose, et cela semble paradoxal, d'une part sur des capacités et des fonctions cérébrales distinctes et d'autre part sur l'interconnectivité. Il serait très utile de déterminer des stratégies permettant de surmonter « l'anxiété mathématique ».
- Comparer les différentes activités cérébrales – réseaux neuraux, fonctions cognitives et mémoire – chez des « spécialistes » d'un domaine, chez des apprenants de niveau moyen, et enfin chez des individus confrontés à de réels problèmes. Cela permettrait de mieux définir ce qu'est un apprentissage réussi, et aussi de développer des méthodes d'enseignement efficaces et ciblées.

Naissance d'une science de l'apprentissage

De récentes avancées en neuroscience ont fourni des éléments importants pour l'éducation. En parallèle, la recherche en sciences de l'éducation a accumulé un grand nombre de données relatives à l'apprentissage. Il est évident que la neuroscience pourrait apporter une dimension nouvelle et importante à l'étude de l'apprentissage, et que ce que les éducateurs en savent pourrait aider la neuroscience à traiter des questions les plus pertinentes. Mais les deux domaines sont déjà bien en place, leurs cultures sont solidement ancrées, leurs méthodes et leur langage sont spécifiques, et les spécialistes d'un domaine ont beaucoup de mal à utiliser les connaissances de l'autre. La création d'un champ transdisciplinaire permettrait de réunir les différentes communautés et leurs perspectives propres. Il faut établir une relation réciproque, semblable au lien entre biologie et médecine, afin d'alimenter l'échange continu et bidirectionnel d'informations, nécessaire à une pratique éducative informée par ce qu'on sait du fonctionnement cérébral et fondée sur les éléments scientifiques dont on dispose. Chercheurs et praticiens peuvent collaborer pour déterminer des thèmes de recherche pertinents, et réfléchir ensemble sur les implications des résultats obtenus. Lorsque des méthodes éducatives issues de la recherche sur le cerveau seront mises en place, les praticiens devront toujours en étudier

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

l'efficacité et alimenter le travail des chercheurs en leur rapportant les résultats obtenus en classe. La création de lieux où pratique éducative et recherche sont intimement liées semble une excellente façon de stabiliser le travail transdisciplinaire.

La neuroscience de l'éducation peut participer à la création d'une véritable science de l'apprentissage. Elle pourrait même servir de modèle à la formation d'autres champs transdisciplinaires. Nous espérons que cette publication contribuera à faire naître une véritable science de l'apprentissage, qui sera un modèle de fusion transdisciplinaire.

Références

OCDE (2002), *Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage*, OCDE, Paris.

OCDE (2005), *L'évaluation formative : pour un meilleur apprentissage dans les classes secondaires*, OCDE, Paris.

OCDE (2006), *Personnaliser l'enseignement*, OCDE, Paris.

PARTIE II

Articles en coopération

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE II

Article A

Cerveau, développement et apprentissage durant la petite enfance

par
Collette Tayler, School of Early Childhood, Queensland University of Technology, Australie
Nuria Sebastian-Galles, Faculté de psychologie, Université de Barcelone, Espagne
Réactions : Bharti, National Council for Educational Research and Training, Inde

A.1. Introduction

L'apparition de techniques d'imagerie cérébrale non invasives a permis aux neurosciences, et surtout à la neurobiologie du développement, de réaliser des avancées sans précédent. Nous savons depuis des décennies que la croissance et le développement du cerveau sont génétiquement programmés dès la conception; mais, au niveau cellulaire, nous commençons seulement à comprendre comment les stimuli environnementaux influencent et contrôlent cette information génétique. C'est seulement depuis peu que le cerveau occupe une place prépondérante dans la recherche et la politique de l'éducation, en particulier pour l'apprentissage durant la petite enfance. Dans ce domaine, des dizaines d'années de recherche en sciences de l'éducation ont abouti à différentes conclusions, dont certaines – mais pas toutes – rejoignent les résultats obtenus en neurologie (Ansari, 2005; Slavin, 2002; Bruer, 1997).

Cet article résume ce que les neurosciences révèlent du développement architectural et fonctionnel du cerveau chez l'enfant, et s'intéresse aux possibilités que ces connaissances nouvelles offrent pour favoriser l'apprentissage et le développement dans la petite enfance. Nous présentons les idées et les découvertes soulignant l'importance de cette période (de 0 à 96 mois) pour l'apprentissage et donnant des indications pour la mise en place d'environnements favorables. En conclusion, nous proposons des pistes de recherche qui prennent en compte les interrogations, les intérêts et les compétences des neuroscientifiques et des éducateurs afin de faire progresser la recherche en sciences de l'éducation.

A.2. Que savons-nous du développement cérébral chez les nouveaux-nés, les bébés et les jeunes enfants?

A.2.1. Processus du développement initial du cerveau

Dès la conception, l'information génétique contrôle la création et la reproduction des cellules du fœtus. Le cerveau comporte des milliards de neurones (les cellules élémentaires) et des milliers de milliards de synapses, les connexions qui envoient et reçoivent les signaux électro-chimiques (Shore, 1997). Chez l'homme, les neurones sont produits en énormes quantités durant les deux premiers trimestres de gestation pour atteindre un maximum à sept mois. Le cerveau grossit très vite. Ensuite, chez le nouveau-né, les neurones excédentaires sont « élagués » *via* un processus de sélection naturelle au niveau cellulaire. Cet élagage sélectif permet un « réglage » précis, à la fois structurel et fonctionnel, du cerveau humain. Les neurones déjà existants à la naissance forment ensuite un réseau de mieux en mieux capable d'apprendre et de s'adapter. Le nombre de neurones n'évolue guère après la naissance, à la différence du nombre de synapses, qui lui augmente très vite (Goswami, 2004).

Peu après la naissance, la formation d'un réseau neuronal dans l'hippocampe permet au bébé de commencer à traiter et stocker l'information sensorielle. À deux ou trois mois, les connexions se font plus rapidement dans les lobes pariétaux, occipitaux et temporaux.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Ceux-ci ne reçoivent pas l'information directement de l'environnement extérieur, mais traitent les données envoyées par les zones sensorielles et motrices primaires. Ils permettent des mouvements de plus en plus complexes et coordonnés. La formation de circuits neuraux permanents dans les lobes frontaux – qui effectuent les tâches les plus complexes – se fait généralement à partir de six mois, âge où l'enfant commence à agir en fonction d'un but. La plus grande part du développement cérébral a lieu durant les premières années de la vie.

Le développement normal du cerveau humain respecte certaines constantes universelles. À la naissance, le réseau neuronal apparu durant la gestation continue de croître et se myélinise dans la moelle épinière, le thalamus, les zones sensorielles et motrices primaires, et une partie du cervelet. Cela permet au nouveau-né de respirer, crier, dormir et s'éveiller, reconnaître l'odeur et la voix de sa mère, téter, avaler, excréter et effectuer des mouvements élémentaires des jambes, des bras et des mains : autant de fonctions nécessaires à la survie. Le développement neurologique se poursuit afin que ces fonctions s'affinent et s'améliorent. L'enfant est alors capable d'être attentif, de réagir, d'établir des relations, de bouger comme il le veut, de parler et de représenter des idées sous forme symbolique (voir encadré A.1).

Encadré A.1. **Émotions et mémoire (apprentissage)**

Quand nous sommes en colère ou inquiets, notre capacité d'apprentissage diminue. Et, alors que les adultes ont un certain contrôle sur leurs sentiments, les enfants y arrivent moins bien. Pourquoi?

Dans le cerveau, l'amygdale est un élément très important dont le rôle est de réguler les émotions. Elle a la forme d'une petite amande (*almold* en latin) située au centre du cerveau. Avec l'hypothalamus, l'amygdale est la principale source de substances chimiques du cerveau. Elle reçoit des signaux de différentes zones sensorielles ainsi que de centres secondaires, et est directement responsable de la régulation du rythme cardiaque et de la pression sanguine. Avec l'hypothalamus, elle contrôle beaucoup d'hormones.

Les hormones ne servent pas seulement à réguler la sexualité ou la croissance : d'elles dépend aussi la façon dont l'information est transmise dans le système nerveux. La libération de certaines hormones augmente notre capacité à transmettre l'information, et donc à apprendre. Inversement, d'autres hormones limitent cette capacité. Quand quelqu'un est en colère ou inquiet, il lui est donc plus difficile d'apprendre. C'est plus sensible chez les jeunes enfants, qui ne savent pas encore bien contrôler leurs émotions.

Un autre élément du système amygdale-hypothalamus contribue à expliquer les différences entre les réactions émotionnelles des enfants et des adultes : le lobe frontal. Cette partie du cerveau est la dernière à se développer. Responsable des éléments les plus « rationnels » de la cognition (prévoir et raisonner), le lobe frontal « tempère » l'influence du système amygdale-hypothalamus. Les adultes peuvent (et doivent) donc contrôler leurs émotions et faire preuve de rationalité, même dans des circonstances difficiles (voir les explications sur le contrôle des émotions au chapitre 3).

Il y a cependant de grandes différences individuelles dans le développement cérébral. On peut voir le cerveau d'un bébé comme une unité de traitement de l'information, et le réseau neuronal comme un circuit doté d'une infinité de connexions possibles. Le câblage obtenu est propre à chaque enfant, et dépend d'une combinaison de facteurs génétiques et

environnementaux. À la naissance, chaque neurone du cortex compte environ 2 500 synapses, mais à 3 ans, ce chiffre est de 15 000 – environ deux fois ce qu'on observe chez l'adulte (Gopnik, Meltzoff et Kuhl, 1999). Dans l'année qui suit la naissance, la taille du cerveau est multipliée par 2.5 : elle passe de 400 grammes à 1 kilo environ (Reid et Belsky, 2002). Cette période est celle où le cerveau grossit le plus; le gain de poids est surtout dû à l'apparition d'« améliorations », comme la myélinisation. On voit combien les quatre premières années de la vie donnent lieu à un développement impressionnant.

Nelson (2000) étudie le développement de la vue, du langage et des fonctions cognitives supérieures, et confirme la vitesse de développement jusqu'à 2 ou 3 ans. À cette période, seules les synapses stabilisées ou consolidées par l'usage sont conservées (Changeux et Dehaene, 1989). Cet élagage sélectif est dû à une interaction de causes génétiques et environnementales (Reid et Belsky, 2002). Rutter montre que le développement cérébral est régi par les probabilités et décrit cette interaction en ces termes :

> «… le schéma général et l'évolution globale sont génétiquement programmés, mais le processus de développement est largement influencé par l'environnement et par le fonctionnement du cerveau en termes d'interaction cellulaire » (Rutter, 2002, p. 11).

Les expériences auxquelles l'individu est régulièrement confronté aboutiront à la myélinisation des synapses concernées. Ce « câblage » va alors permettre de coder et d'enregistrer les expériences de vie et d'apprentissage du bébé et du jeune enfant.

A.2.2. Le rôle de l'expérience

On considère que l'expérience commence avec l'activation des neurones sensoriels, qui a pour effet de connecter des cellules dans des couches cérébrales plus profondes. Clark (2005) décrit ce processus : « Si manger une pomme active un certain groupe de cellules, celles-ci à leur tour activent des cellules de la deuxième couche que l'apprentissage a "câblées" pour qu'elles identifient le goût d'une pomme. Les cellules de la deuxième couche ne sont pas programmées génétiquement pour reconnaître la pomme ou le citron. C'est l'expérience qui les en rend capables » (p. 681). Il est donc probable que penser à une expérience, ou à un sujet, est le résultat de processus complexes répartis dans de nombreux composants neuraux.

Le développement neural des enfants – issu à la fois de la génétique et de l'environnement – dépend d'influences qui commencent pendant la gestation. C'est pourquoi le bien-être de la mère pendant la grossesse (y compris la façon dont elle se nourrit, fait de l'exercice et se repose) contribue au bon développement du cerveau du bébé. De même, après la naissance, une nourriture adaptée, un environnement physique sain et non pollué, et des conditions psychosociales favorables sont importants dans le développement cérébral du nouveau-né.

A.2.3. Choisir le bon moment – les facteurs importants du développement cérébral

La création de synapses et la myélinisation sont les deux activités cérébrales principales des bébés et des jeunes enfants; elles n'ont pas lieu au même moment dans toutes les zones du cerveau. Ce processus est fondamental pour le développement cognitif, physique, moteur, linguistique, social, culturel et émotionnel. Selon l'âge et le niveau de développement de l'enfant, l'information sensorielle reçue par le toucher, le goût, l'ouïe, la vue et l'odorat stimule neurones et synapses pour finir par créer des chemins neuraux de plus en plus complexes et sophistiqués qui transmettent, traitent, assimilent et stockent

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

l'information pour un usage présent et futur. Les bébés et les jeunes enfants découvrent le monde *via* des expériences sensorielles variées, qui sont d'une importance capitale pour leur cerveau. Celui-ci change en fonction de l'expérience; des expériences répétées renforcent les réseaux de neurones.

L'interaction de la génétique et de l'environnement a lieu dès avant la naissance, grâce à l'existence d'information sensorielle *in utero*. Ainsi, jouer de la musique durant le troisième trimestre de la grossesse influence l'activité et le développement du fœtus (Kisilisky et autres, 2004). Néanmoins, comme le montrent Thompson et Nelson (2001), les influences respectives de la génétique et de l'environnement sur la production de synapses ne sont pas clairement identifiées. Malgré l'avancée rapide des connaissances sur le développement cérébral (grâce à l'apparition de techniques nouvelles), on ne sait pas encore comment (dans quel ordre, et à quel moment) la surproduction et l'élagage des neurones et des synapses sont déterminés. Il n'y a pour le moment qu'un nombre restreint de méthodes permettant d'étudier à la fois les multiples stimuli environnementaux et l'activité dynamique du cerveau.

Les règles éthiques empêchent d'utiliser certaines méthodes de recherche. En général, les études se font d'abord sur des animaux (surtout des rats). Les conclusions obtenues sont ensuite adaptées à l'homme, longuement affinées et soumises à des études approfondies. Les autopsies de cerveaux humains sont également utilisées. Elles permettent d'estimer « l'évolution avec l'âge de la densité synaptique, bien que parfois on ne dispose que de quelques spécimens d'un âge donné » (Thompson et Nelson, 2001, p. 9). Ces résultats sont statiques, et ne disent pas si les synapses dénombrées sont dues à la génétique ou à l'expérience.

A.2.4. La plasticité, caractéristique fondamentale du cerveau des bébés

À la naissance, les réseaux de neurones sont extrêmement « plastiques » dans le traitement et le stockage d'information; des circuits sont en permanence formés, détruits, affaiblis ou renforcés. Cela tend à indiquer que la petite enfance est une période très importante pour le développement de capacités physiques, cognitives, linguistiques, sociales et émotionnelles. Cette notion de plasticité ne signifie pas que toutes les zones de cerveau d'un enfant peuvent apprendre la même chose. Selon Gazzaniga (1998), puisque le cerveau réagit à la stimulation et à l'expérience, les réseaux neuronaux d'un individu donné lui sont propres, et son cerveau est unique. Pour autant, la plasticité ne permet pas au cerveau de s'« autocâbler ». Crick (1994, p. 10) formule les choses ainsi : « Nous savons à présent que le cerveau d'un nouveau-né n'est pas une *tabula rasa*. C'est une structure élaborée dont beaucoup d'éléments sont déjà en place. Ensuite, l'expérience le règle et l'affine jusqu'à ce qu'il soit capable d'un travail de précision. »

Les études expérimentales et pathologiques du développement cérébral chez les animaux, comme l'observation de l'activité cérébrale humaine au niveau neural, indiquent que la plasticité des réseaux de neurones est programmée génétiquement pour varier selon les périodes de la vie (Dyckman et McDowell, 2005; Kolb et Whishaw, 1998). Après la naissance, la plasticité permet la *formation* et le *développement* de circuits propres à chaque individu selon les stimuli génétiques et environnementaux qu'il reçoit. La croissance et le développement des circuits neuronaux dépendent de processus épigénétiques (l'expression des gènes, influencés par des stimuli extérieurs), liés à l'âge de la personne, et servent de base à la notion de périodes « critiques » et « sensibles » du développement cérébral.

A.2.5. Périodes critiques ou sensibles du développement neural ?

Les sciences de l'éducation ont déjà confirmé l'importance des expériences et de l'environnement pour l'apprentissage et le développement des enfants (Sylva et autres, 2004; Thorpe et autres, 2004). L'étude des périodes critiques et des conséquences d'une privation sensorielle au début de la vie semble montrer que chez certaines espèces, le développement structurel et fonctionnel de certains éléments du cerveau nécessite que certaines expériences aient eu lieu à une période précise. Par exemple, chez les oiseaux, le chant ne peut s'apprendre qu'à un âge donné, qui varie selon les espèces et dépend des conditions (Brainard et Doupe, 2002). Si certains réseaux spécifiques (par exemple dans le cortex visuel) ne sont pas créés au bon moment, la perte d'activité corticale suscitée par la vision peut être irréversible (Fagiolini et Hensch, 2000). La durée des périodes critiques semble varier entre les espèces selon leur espérance de vie moyenne.

Pourtant le concept de périodes critiques chez l'humain n'est plus défendu, puisqu'on sait qu'il n'est jamais trop tard pour apprendre (Blakemore et Frith, 2005). Chez l'homme, les périodes dites « critiques » sont en fait simplement « sensibles » et durent des années (par exemple, toute la petite enfance). « L'une des grandes idées actuellement étudiées en neuroscience veut que ces périodes critiques représentent des périodes où la plasticité cérébrale est à son apogée et où les expériences sensorielles produisent des changements permanents et importants dans les circuits neuronaux. » (Ito, 2004, p. 431). On s'aperçoit que ces « périodes sensibles » du développement humain respectent une chronologie identique pour chacun. Il importe de repérer les problèmes sensoriels (handicaps visuels ou auditifs par exemple) le plus tôt possible, car ils risquent d'avoir des conséquences durables.

> « Il semble que la privation sensorielle à un très jeune âge peut avoir des conséquences durables, parfois très subtiles et indétectables dans la vie quotidienne. On a des raisons de croire qu'il est possible de surmonter ces conséquences et d'apprendre tout de même. Cet apprentissage tardif est sans doute différent de celui qui se serait produit naturellement durant la période sensible » (Blakemore et Frith, 2005, p. 461).

Les deux premières années sont considérées comme très sensibles pour la création de réseaux neuronaux dédiés à l'attention, la perception, la mémoire, le contrôle moteur, la régulation des émotions, ainsi qu'au langage et à la capacité à établir des relations (Davies, 2002). L'acquisition du langage est le mieux connu des processus liés aux périodes spécifiques du développement de l'enfant. La capacité d'acquérir un langage semble décliner à partir du milieu de l'enfance. L'environnement du bébé durant une période sensible, par exemple, affecte sa capacité ultérieure à différencier les phonèmes. Après l'adolescence, les humains ont plus de mal à apprendre une nouvelle langue et à prononcer un phonème non familier; c'est lié aux limitations physiologiques qui apparaissent après la fin des périodes sensibles.

Toute la vie, mais surtout durant les périodes sensibles, la répétition des stimuli, donc la (re)formation de circuits neuronaux, permet aux neurones et aux synapses de se spécialiser progressivement quant au type d'information qu'ils traitent et retiennent. La myélinisation préserve les circuits mis en place, accélère la transmission de l'information et en garantit la qualité. Une fois myélinisés, circuits neuronaux et synapses sont fixés à vie, à moins d'un accident cérébral ou d'une dégénération cellulaire. Parallèlement, les synapses inutilisées sont éliminées ou « élaguées », afin de maximiser l'efficacité des neurotransmetteurs. Le nombre de synapses disponibles pour créer des circuits neuronaux permanents diminue avec le temps. Ce phénomène n'est pas sans conséquences sur l'apprentissage, et souligne

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Encadré A.2. **Le développement initial du langage**

Un enfant qui commence à parler connaît déjà bien sa langue maternelle. Dès la naissance, les bébés arrivent à faire la différence entre certaines langues (par exemple le japonais et le néerlandais). D'autres mammifères, comme les pinchés à crête blanche et les rats, en sont capables également. Plusieurs techniques d'imagerie cérébrale ont révélé que de très jeunes bébés (moins de trois mois) à qui on fait entendre du langage normal montrent une activation des zones de l'hémisphère gauche plus importante que des adultes qui entendent la même chose. En revanche, ni les uns ni les autres ne présentent d'augmentation d'activité dans ces zones si l'enregistrement est passé à l'envers (toutefois, l'activité effectivement observée n'est pas la même dans les deux groupes). Les bébés sont capables de distinguer tous les phonèmes de toutes les langues existantes, même quand leurs parents n'arrivent ni à les distinguer ni à les prononcer (les bébés japonais distinguent le /l/ du /r/ alors que leurs parents n'en sont pas capables). À la naissance, les hommes sont donc capables de traiter les signaux langagiers; cette capacité est universelle, car les nouveaux-nés peuvent apprendre indifféremment n'importe quelle langue. Pendant leurs premiers mois, ils règlent progressivement leurs capacités de traitement du langage aux particularités de la langue parlée autour d'eux. Entre 6 mois et un an, ils cessent de distinguer certains contrastes inutiles (les bébés japonais ne font plus la différence entre le /r/ et le /l/) et affinent leurs catégories phonémiques dans leur langue maternelle. Au départ généralistes corrects, ils deviennent de bons spécialistes. Il semble bien que réussir à adapter les capacités initiales aux propriétés du système phonétique de sa langue maternelle joue un rôle important dans l'acquisition du langage; plus tôt les bébés cessent d'identifier les phonèmes étrangers, plus vite ils apprendront leur langue maternelle.

À mesure qu'ils maîtrisent les phonèmes, les bébés apprennent à traiter le signal langagier et finissent par découvrir les mots et par comprendre les propriétés syntaxiques et morphologiques de leur langue, grâce à des régularités qu'ils observent peu à peu. Ainsi, la probabilité qu'un phonème particulier en suive un autre est plus élevée à l'intérieur d'un mot qu'entre deux mots. Plusieurs études ont montré que dès huit mois, les bébés utilisent de tels indices pour segmenter le discours en mots. Il faut bien noter que, au contraire du langage écrit, le langage parlé ne dispose pas de marqueurs fiables pour délimiter les mots. On voit à quel point le cerveau des bébés est complexe et efficace. (Après tout, on n'a pas encore réussi à mettre au point des machines capables de segmenter et d'identifier les mots avec autant d'efficacité qu'un enfant de 12 mois.)

l'importance de l'apprentissage durant la petite enfance; il implique néanmoins qu'on peut toujours apprendre après la fin des périodes sensibles. On ne sait pas exactement quel effort supplémentaire devra alors être fourni, ni si le degré de réussite sera moindre.

A.2.6. Périodes sensibles et plasticité cérébrale

Ces deux notions – *périodes sensibles* et *plasticité cérébrale* – semblent opposées (Hannon, 2003). D'un côté, la plasticité implique qu'on peut apprendre à tout âge, qu'il n'est jamais trop tard. Mais d'un autre côté, les périodes sensibles montrent qu'il existe des moments clés, et qu'il est bon d'apprendre au début de la vie. À l'exception des études sur le langage, les preuves de l'existence des périodes sensibles sont pour la plupart issues d'expériences sur des animaux (voir par exemple Mitchell, 1989). Aujourd'hui, les deux idées sont soutenues par des bases solides. Il faudra continuer les recherches afin de déterminer en quoi l'apprentissage est facilité pendant les périodes sensibles, et en quoi la plasticité permet de passer outre celles-ci.

A.2.7. Apprendre durant la petite enfance, et au-delà

Les bébés et les très jeunes enfants apprennent à parler et à marcher sans qu'on doive le leur enseigner, grâce à un mélange d'influences génétiques et de stimuli environnementaux. Les liens entre attention, apprentissage explicite et apprentissage implicite sont encore mal connus. Le cerveau remarque des choses dont l'esprit n'a pas conscience, pourtant, comme le fait remarquer Goswami (2005), « alors que les enfants passent le plus clair de leurs journées en classe, leur cerveau ne remarque pas tout seul comment faire des additions, ni comment lire. Ces savoir-faire doivent être directement enseignés » (p. 468). Ce qu'on sait actuellement de l'apprentissage implicite (apprendre sans prêter attention) vient surtout d'études du système moteur, bien que l'apprentissage inconscient d'une grammaire artificielle soit évoqué par Blakemore et Frith (2005). Quel est le rôle du développement génétiquement programmé dans l'apprentissage durant la petite enfance et au-delà ? En quoi l'acquisition d'informations implicites sur les valeurs, les attitudes et les croyances, en quoi l'apparition d'une cognition sociale et d'une régulation émotionnelle affectent-elles le développement de capacités fonctionnelles ? Il est capital, pour l'avancée des sciences de l'éducation, d'éclairer les liens entre apprentissage explicite et apprentissage implicite. Pour cela, on a besoin d'études interdisciplinaires, surtout centrées sur les premières années de vie.

Encadré A.3. **Les neurones miroirs**

Les enfants imitent facilement ce qu'ils voient et ce qu'ils entendent. Parents et éducateurs s'inquiètent pour la sécurité de l'enfant, et les risques liés à l'exposition à un modèle négatif. Beaucoup de parents s'alarment de la violence véhiculée par les médias ; les gouvernements essaient d'empêcher les enfants d'accéder à des pages Internet choquantes. L'école ne cherche pas seulement à apporter un savoir, mais aussi à fournir des modèles positifs. Pourquoi est-ce si important ?

Les humains ont une grande faculté d'imitation. Face à quelqu'un qui souffre, on est triste, et on peut même pleurer. Quelqu'un qui rit nous fait rire à notre tour. (Même un inconnu dans un bus. Certains rires sont très contagieux.) Des traces de ce phénomène peuvent être observées très tôt. Si on tire la langue à un nouveau-né, il fera de même.

Jusque très récemment, on ne connaissait pas les mécanismes neuraux à l'œuvre dans ce cas. En 1996, un neuroscientifique italien a fait une découverte extraordinaire grâce à laquelle on a pu commencer à comprendre l'imitation. Giacomo Rizzolatti et ses collègues de l'université de Parme ont découvert dans le cerveau des singes des « neurones miroirs » qui s'activent quand l'animal utilise sa main pour une tâche bien précise (prendre une cacahuète et la porter à sa bouche, par exemple). Mais ces mêmes neurones s'activent également quand le singe voit un autre singe réaliser cette même tâche. La correspondance est très précise : si l'expérimentateur fait le même mouvement, mais sans cacahuète, le neurone miroir n'est pas activé.

La découverte de ces neurones (situés chez les singes dans une zone analogue à ce qui est chez l'homme l'aire de Broca, l'un des principaux centres de traitement du langage) a débouché sur un grand nombre d'études. Les neuroscientifiques étudient en ce moment l'idée que si nous comprenons les actions (voire les sentiments) d'autrui, c'est parce que, quand nous les voyons, nos neurones miroirs sont activés : nous ressentons donc la même chose que si c'était nous qui effectuions l'action ou avions ce sentiment. Un fonctionnement anormal des neurones miroirs pourrait-il être la cause de certaines pathologies psychiatriques ? Voici un domaine palpitant pour la recherche actuelle.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Plusieurs éléments prouvent qu'on n'apprend plus de la même façon après la fin de l'enfance. Rutter (2002) rappelle qu'on ignore encore la mesure exacte de la plasticité conservée ensuite, et les différences de plasticité entre les différentes zones du cerveau. Ainsi, l'apprentissage d'une langue étrangère à l'adolescence met en jeu des zones différentes de celles utilisées par un enfant pour apprendre sa langue maternelle (Kim et autres, 1997); l'apprentissage dû à des expériences individuelles nouvelles ou inhabituelles a des conséquences neurologiques tout au long de la vie. « Un tel apprentissage diffère du développement programmé, et affecte concrètement le cerveau; pourtant, les rapports entre structure et fonction sont encore très mal connus » (Rutter, 2002, p. 13).

A.3. Quelle est l'importance des premières années de la vie dans le développement et l'apprentissage?

L'apprentissage et le développement à ce stade de la vie sont particulièrement importants pour la performance. Pour les éducateurs et les pédiatres, il est très tentant de décrire la petite enfance comme une période importante et sensible pour le développement et l'apprentissage. On sait que les conditions de vie durant la petite enfance influent sur la différentiation et la fonction des milliards de neurones, et que l'expérience crée des liens entre différentes aires cérébrales (dont l'emplacement est connu). En l'absence de stimuli environnementaux appropriés, le développement et le fonctionnement du cerveau sont généralement modifiés, inférieurs à la norme et/ou retardés, ce qui a des conséquences sur l'apprentissage et le développement de l'enfant. Les pratiques d'éducation, les liens adultes-enfants et les programmes d'accueil et de scolarisation des jeunes enfants sont donc très importants, et beaucoup de pays leur accordent une grande attention. *Petite enfance, grands défis II* (OCDE, 2006) s'est intéressé aux politiques et services d'accueil et de scolarisation des jeunes enfants dans vingt pays membres de l'OCDE. Les économistes ont montré qu'investir sur l'apprentissage des jeunes enfants était une bonne chose pour la société selon des critères humains, sociaux et identitaires (Lynch, 2004; Heckman et Lochner, 1999). Cunha et autres (2005) mettent en évidence l'influence des capacités et de la motivation à une période de la vie sur les capacités et la motivation aux périodes suivantes. On considère donc qu'investir dans les premiers stades de la vie augmente la productivité, et que ne pas le faire a des conséquences néfastes sur la suite du parcours. En bref, le soin porté aux très jeunes enfants est d'une importance majeure en raison de l'amplitude énorme du développement à cet âge. Ce fait est la clé de voûte des arguments prônant la qualité et l'universalité des programmes de soutien à la petite enfance et à la famille.

A.3.1. Les avantages des programmes destinés aux jeunes enfants

La neuroscience a permis de cerner les moments clés et les points faibles du développement des bébés et des jeunes enfants. Les responsables des programmes destinés aux jeunes enfants sont concernés au premier chef. Parmi les mesures prises, certaines sont discutables en raison de généralisations trop hâtives des conclusions issues d'études sur les animaux. Hannon (2003) cite certaines de ces mesures :

- Développement prénatal : il est indéniablement bénéfique d'intervenir dans des cas où le bon développement de l'enfant à naître est menacé (mère souffrant de malnutrition, de syndromes neurotoxiques, ou de maladies infectieuses comme la rubéole); voir Shonkoff et Phillips, 2000.

- Synaptogénèse et élagage : certains supposent qu'un niveau de stimulation élevé durant les trois premières années augmenterait le nombre de synapses conservées, ce qui serait profitable aux enfants. On trouve sur le marché une foule de produits (électriques, mécaniques, alimentaires) et de programmes censés augmenter l'intelligence des bébés et des enfants. Ils ne reposent sur aucune preuve (Bruer, 1999a et b; Goswami, 2004, 2005). Ce qu'on sait en revanche, c'est que le manque de contacts humains et un environnement peu stimulant sont néfastes – par exemple dans le cas de mauvais traitements et de négligence (Rutter et O'Connor, 2004).
- Cognition sociale et régulation émotionnelle : la capacité des enfants d'âge préscolaire d'évaluer la fiabilité des informations qu'ils reçoivent a été globalement sous-estimée (Koenig et Harris, 2005). Les recherches montrent de plus en plus que les très jeunes enfants évaluent de façon très sûre leurs expériences et ce qu'ils en retirent. Nous commençons seulement à mesurer la complexité de la cognition et de l'interaction sociales (Davis, 2004), et les futures découvertes relatives à la façon dont les jeunes enfants prêtent foi à ce qu'ils apprennent constitueront une base solide pour les programmes éducatifs.
- Les périodes sensibles : bien que les résultats obtenus par Weisel et Hubel sur les effets de la déprivation visuelle chez les chatons ne soient pas applicables à des enfants, on peut néanmoins penser qu'il existe des périodes durant lesquelles certains apprentissages doivent avoir lieu, même s'il serait probablement possible de rattraper ultérieurement un éventuel retard. La psychologie a démontré l'existence de périodes sensibles pour l'acquisition du langage. Pour l'instant, les preuves neuroscientifiques de l'existence de périodes sensibles chez l'humain sont limitées.
- Complexité environnementale : les études de Greenhouth et autres (1972, 1987) montrent que la complexité de l'environnement influence le développement cérébral des rats. Ceux qui vivent dans un environnement complexe réussissent mieux à trouver leur chemin dans un labyrinthe. Les programmes destinés à la petite enfance prônent des environnements « enrichis », même si on ne dispose pas de preuves directes de leur utilité. Les éducateurs bien intentionnés fournissent aux enfants de grandes quantités de jouets et d'objets stimulants, aux couleurs vives, afin qu'ils apprennent plus et mieux. Cette attitude doit être mise en cause. Si des privations sensorielles et sociales sont effectivement néfastes, en revanche de tels environnements enrichis n'améliorent pas forcément le développement cérébral (Blakemore et Frith, 2005).
- La plasticité neurale : on s'est aperçu que les premières années de vie ne sont ni les seules pertinentes pour l'apprentissage à long terme, ni les seules responsables de la suite du parcours d'apprentissage. Le cerveau reste toujours capable de changer; des capacités jamais développées, ou censément perdues, peuvent dans une certaine mesure être (ré)acquises ultérieurement.

A.3.2. L'apprentissage, élément crucial de la petite enfance

Naturellement, l'apprentissage des premières années est d'une importance cruciale pour l'homme. Les pratiques éducatives accumulent des preuves empiriques (soutenues et précisées par la neuroscience) sur les périodes clés et les interventions qui favorisent le développement et l'apprentissage. Blakemore et Frith (2005) disent que le cerveau a évolué « pour éduquer et être éduqué » (p. 459). Ce que les adultes tenaient naguère pour acquis, surtout à propos du développement des bébés et des jeunes enfants, est aujourd'hui au cœur de nouvelles découvertes et de prises de conscience.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Ce qu'on apprend du développement synaptique montre que les expériences socio-émotionnelles des premières années sont « les graines de l'intelligence humaine » (Hancock et Wingert, 1997, p. 36). Cela dit, la tentation d'aider bébés et jeunes enfants à enrichir leur connaissance du monde en les exposant aux produits multimédias et à Internet ne doit pas faire perdre de vue les preuves empiriques en faveur d'un apprentissage dû à un environnement concret et cohérent.

Pour la petite enfance, les études sur l'apprentissage sont basées sur un ensemble de théories complémentaires et divergentes. Quatre découvertes ont été faites par des études microgénétiques dont les orientations théoriques, la nature des tâches et l'âge des enfants diffèrent (Siegler, 2000). La première montre que *le changement est graduel*, surtout si l'approche d'abord retenue est facile et pratique (bien que longue), comme compter sur ses doigts pour faire une addition. La seconde, *les découvertes se font grâce aux succès aussi bien qu'aux échecs*, confirme que les enfants développent des stratégies nouvelles pour résoudre les problèmes rencontrés, surtout en l'absence de pression extérieure. Cela s'observe clairement lorsqu'ils jouent librement. La troisième, *l'apprentissage ultérieur est lié à la variabilité*, et la quatrième, *les découvertes nécessitent une compréhension conceptuelle*, ont des conséquences sur les méthodes pédagogiques. La confiance relative que les enfants accordent aux stratégies qu'ils utilisent se modifie avec l'expérience, bien que des stratégies diverses et contradictoires puissent coexister durant d'assez longues périodes. L'apprentissage des enfants est marqué par la découverte de nouvelles façons de penser, par une utilisation de plus en plus fréquente d'une réflexion efficace, et par une meilleure exécution d'approches alternatives. Les éducateurs peuvent faciliter l'accès des jeunes enfants à la pensée conceptuelle. Étant donné l'intensité de production de réseaux neuronaux chez les bébés et les très jeunes enfants, et puisqu'on sait aujourd'hui que des souvenirs se forment bien avant que l'enfant ne soit capable de décrire verbalement ses expériences passées (Bauer, 2002), il faut accorder aux interactions adultes/enfants l'importance qu'elles méritent, que ce soit au sein des familles ou dans des lieux de vie en collectivité.

A.3.3. Ce qui nuit à l'apprentissage

Les premières années étant fondamentales, des expériences inadaptées ou insuffisantes peuvent être nuisibles. Rutter (2002, p. 9) confirme que certaines situations font courir à l'enfant des risques psycho-pathologiques :

- conflits persistants, mauvais traitements, attitudes négatives dirigées contre l'enfant ;
- manque d'attention individualisée et de continuité dans l'éducation ;
- manque d'interactions, de conversations, de jeux ;
- ambiance sociale négative ou favorisant des comportements anti-sociaux.

Dans tous ces cas, c'est *l'érosion relationnelle* qui est néfaste. Des relations sociales inadaptées, insuffisantes ou dangereuses ont des retombées durables. Davies dit, après avoir étudié le cerveau d'orphelins roumains qui ont grandi dans un contexte social et émotionnel difficile : « Presque tous ces enfants montrent des anomalies fonctionnelles évidentes dans plusieurs aires cérébrales liées aux émotions » (Davies, 2002, p. 425). Heureusement, comme l'expliquent Rutter et O'Connor (2004), l'hétérogénéité des situations montre qu'on peut faire quelque chose contre un développement biologique anormal et les dommages cérébraux subis. En quoi la relation entre l'éducateur et l'enfant contrebalance-t-elle le rôle de l'environnement matériel? Pour l'instant, on sait que

l'entourage des jeunes enfants – parents, famille, professionnels extérieurs à la famille, pédagogues – doit les encourager, les stimuler et construire avec eux des relations qui développent leur potentiel humain.

A.3.4. Soins et éducation à la petite enfance : il n'y a pas de baguette magique

La fin de l'enfance ne marque pas l'arrêt du développement cérébral, et la plasticité dure toute la vie. On est souvent très péremptoire quant aux conséquences des événements de la petite enfance sur le comportement ultérieur. Il n'y a pas encore eu d'études empiriques sur l'efficacité des programmes de « prévention » ciblant la petite enfance pour éliminer criminalité, comportement antisocial et problèmes sociaux; on ne dispose que d'un assez petit nombre d'études diachroniques américaines qui montrent que la qualité des programmes en faveur de la petite enfance est un élément favorable (Lynch, 2004). Mais il est évident que des interventions ponctuelles ne peuvent pas suffire à changer l'avenir (Karoly et autres, 1998, 2001), même si elles sont importantes étant données la fluidité du développement des jeunes enfants. Plusieurs études ont bien montré les bénéfices à long terme d'actions stimulant entre autres les aires cognitives (Barnett, 1995; Brooks-Gunn, 1995; Karoly et autres, 1998). Leurs effets se poursuivent à l'école primaire, à un rythme qui pourrait dépendre de la qualité de l'environnement éducatif. Les premières années de la vie d'un enfant sont cruciales pour son développement social, scolaire et physiologique ultérieur.

A.4. Les environnements qui favorisent le développement des jeunes enfants

A.4.1. Les liens subtils entre jeu et apprentissage

Le jeu, sans en avoir l'air, permet le développement cérébral et favorise les progrès cognitifs. La recherche en psychologie du développement a montré que durant les trois premières années de leur vie, les enfants disposent déjà d'une base de connaissances très complexe et interconnectée (National Scientific Council on the Developing Child – NSCDC, 2005, 2004a, 2004b), acquise naturellement. Rushton et Larkin (2001) expliquent que l'environnement de l'enfant détermine sa façon d'apprendre. Ainsi, ceux qui évoluent dans un environnement où l'apprentissage est considéré comme central ont une meilleure compréhension verbale (Dunn, Slomkowski et Beardsall, 1994) et une plus grande confiance dans leurs compétences cognitives. Les ouvrages sur l'éducation des jeunes enfants accordent beaucoup d'importance aux programmes basés sur le jeu – même si les applications proposées, et la conception du rôle du jeu dans l'apprentissage, diffèrent.

Observer les jeux des enfants permet de mieux comprendre la façon dont ces derniers réfléchissent et se comportent entre eux. La place respective des activités entreprises par l'enfant lui-même et de celles amenées par les adultes a sans doute une influence sur l'apprentissage. D'ordinaire, les éducateurs préfèrent laisser l'enfant agir et mettent à profit les situations rencontrées pour créer des moments d'apprentissage. Frost (1998) met en évidence cinq principes qui soulignent l'importance du jeu dans le développement cérébral chez l'homme et chez l'animal :

- Tous les jeunes mammifères en bonne santé jouent : les bébés animaux jouent sous le contrôle des adultes; et les bébés humains – dont le développement moteur est plus lent – ont davantage besoin des parents (et d'autres adultes) pour donner une structure et un cadre au jeu, qui sert de base au développement.
- La complexité des jeux augmente rapidement avec le développement neural.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

- Les jeux chez l'animal (courses, sauts…) et chez l'homme (mouvement, langage, négociation) permettent de développer des compétences qui seront nécessaires plus tard.
- Le jeu est essentiel au bon développement, en ce qu'il semble faciliter l'interconnexion du langage, des émotions, des mouvements, de la socialisation et de la cognition « Ce sont les activités ludiques, et pas les instructions directes, l'isolement ou les mauvais traitements, qui sont d'une importance fondamentale pour le développement cérébral et la constitution de l'individu »(Frost, 1998, p. 8).
- Un enfant qu'on empêche de jouer peut développer des troubles du comportement. Néanmoins, Smith et Pellegrini (2004) remettent en question la place prépondérante accordée au jeu (surtout les jeux de mise en scène sociale chez l'homme), et rappellent que son importance n'est pas totalement prouvée. Ils soulignent :

  > « l'importance de l'attitude des adultes (généralement les parents) à l'égard du jeu des enfants. La tendance d'un enfant à jouer (principalement aux jeux d'imitation) varie énormément selon les cultures, et selon que les adultes répriment de tels jeux (en demandant à leurs enfants, parfois très jeunes, de les aider ou de s'occuper d'autres enfants), les tolèrent (afin de se dégager des moments de liberté) ou les encouragent activement (pour favoriser le développement de leurs compétences cognitives et sociales – une forme d'"investissement parental") » (Smith et Pellegrini, 2004, p. 296).

On sait que l'environnement affecte le développement des circuits cérébraux et le processus d'apprentissage; il faut donc accorder beaucoup d'attention aux types d'environnements rencontrés par les enfants, et à leur diversité (Eming-Young, 2002, 2000). La plupart des textes sur l'éducation des jeunes enfants concluent que les programmes basés sur le jeu, bien conçus et bien appliqués, ont un impact positif certain sur les performances intellectuelles, le bien-être social, l'estime de soi et les compétences à l'entrée à l'école. L'importance de la qualité des interactions est soulignée (Katz, 2003).

A.4.2. Rôles des programmes et des orientations pédagogiques dans le développement du jeune enfant

Les éducateurs n'ont pas tous les mêmes conceptions et les mêmes approches. Les programmes de soins et d'éducation à la petite enfance ainsi que les méthodes pédagogiques peuvent donc varier considérablement, ainsi que leurs conséquences pour les enfants. Les adultes impliqués peuvent considérer le jeune enfant comme : une personnalité propre et indépendante; un citoyen disposant du droit de choisir ou non de participer aux activités proposées; un individu qui doit être préparé pour un avenir comportant des défis et des exigences déjà connus; ou encore, en raison de son âge, une personne incapable d'autonomie et qu'il faut diriger précisément. Parents et éducateurs ont tous leurs conceptions propres, et ont en tête ce que les enfants savent ou doivent être capable de faire à chaque étape de leur croissance : cela influence ce qu'on leur propose à la maison, à la crêche, à l'école. L'apprentissage informel tient évidemment une place centrale dans la vie des jeunes enfants. On cherche généralement à leur offrir un environnement qui multiplie les occasions de jeu et de relations sociales, qui est riche en langage et en occasions de communication, et qui stimule la curiosité.

On a appris que le développement du cortex préfrontal chez les enfants dépend de l'amour et du plaisir présents dans les relations avec les proches; que des états de stress prolongés déclenchent la libération massive de cortisol; que le métabolisme du cerveau des jeunes enfants et leur synaptogénèse sont particulièrement élevés (NSCDC, 2005,

2004a, 2004b) : tout cela indique l'importance de certains éléments pour un développement sain et équilibré : des relations humaines harmonieuses, des expériences sensorielles variées, des soins attentifs et adaptés. Si les besoins élémentaires de l'enfants sont satisfaits (santé, sécurité, nourriture, attention, soins), son développement peut se faire d'une façon optimale (confiance, sens critique, capacité à résoudre les problèmes et à coopérer) (Ramey et Ramey, 2000).

La capacité d'attention évolue considérablement durant les premières années; il faut en tenir compte dans les programmes d'éducation et les objectifs pédagogiques. À partir de trois ans, les enfants commencent à pouvoir maintenir leur attention sur de plus longues durées, même s'ils ont encore du mal à s'intéresser à ce qui ne leur semble pas les concerner directement : on voit les conséquences sur la mise en place d'environnements éducatifs selon les étapes du développement. Les programmes qui se basent sur les intérêts de l'enfant et qui mettent à profit les situations rencontrées pour leur permettre d'apprendre sont souvent centrés sur le jeu puis (avec les années) évoluent vers un modèle plus formel, suivant ainsi le développement naturel des enfants.

A.4.3. Favoriser l'acquisition du langage

La petite enfance est la période clé de l'acquisition du langage. Pour les enfants d'aujourd'hui, la littératie nécessite des compétences adaptées à des situations de communication variées dans des situations multilingues. Intégrer les nuances culturelles et apprendre à communiquer par des systèmes multisymboliques (verbaux, écrits, théâtraux, artistiques…) font partie du développement normal des jeunes enfants. Burchinal et autres (2000, 2002) montrent que la qualité des soins et de la formation du personnel dans les structures d'accueil entraîne un meilleur développement cognitif et langagier. L'implication directe dans des situations de communication avec d'autres enfants et des adultes améliore le niveau de langage et les compétences de communication des enfants. Stimulation, cohérence et encouragements interagissent pour améliorer les performances. La curiosité dont les enfants font preuve (et les questions qu'ils posent) aide à cerner leurs connaissances et leur type de réflexion. L'action, l'interaction et la parole permettent de comprendre les choses; on l'observe clairement dans différentes sortes d'environnement d'apprentissage informel.

> « Les relations qui favorisent la croissance sont basées sur un système d'échange et d'interaction entre l'enfant et un autre être humain qui lui fournit l'irremplaçable : des expériences adaptées à l'unicité de la personnalité de l'enfant, à ses intérêts, compétences et envies, qui lui permettent de prendre conscience de lui-même, de ce qu'il est, et qui encouragent le développement de son cœur et de son esprit » (NSCDC, 2004a, p. 1).

L'importance de l'échange et de la relation devrait prévenir les adultes contre l'usage et la promotion de méthodes formatées, prédéterminées – conçues pour un enfant théorique, ou en seule fonction de l'âge – et la réutilisation de programmes, même éprouvés, hors de leur contexte originel. De telles pratiques sont généralement peu efficaces car elles ne prennent en compte ni l'enfant tel qui l'est, ni les circonstances. C'est l'adaptabilité qui permet aux éducateurs d'identifier et d'employer diverses façons d'enseigner, de voir, de créer et de représenter les idées.

A.4.4. Comment encourager l'apprentissage chez les jeunes enfants

Les pratiques éducatives contemporaines se sont développées tout au long du XXe siècle, sous l'influence d'études sur le développement de l'enfant, de théories et d'études sur

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

l'éducation et la psychologie, des politiques gouvernementales, de l'habitude et de l'imitation. Rares sont les programmes issus de recherches scientifiques solides ou d'analyses comparatives de plusieurs théories. Les stratégies généralement utilisées par les éducateurs en ce qui concerne les soins et l'éducation à la petite enfance sont par exemple :

- *Écouter les enfants*. On considère que c'est indispensable pour comprendre les stratégies d'apprentissage mises en place par les enfants face à une activité ou un problème, pour repérer leurs points forts et les domaines où de l'aide extérieure leur serait utile.
- *Écouter les parents et les membres de la famille, et travailler en liaison avec eux*. Cela permet de connaître les centres d'intérêts de l'enfant, ses goûts, et de savoir ce que la vie familiale apporte à son développement.
- *Établir un savoir commun*. Exploiter les situations qui placent des enfants en situation d'interaction (crèche ou école maternelle) permet de se baser sur une expérience partagée pour développer l'esprit de l'enfant. L'encourager à se référer à une expérience passée liée à une activité présente permet d'assurer la continuité de l'apprentissage et d'aborder de nouveaux concepts.
- *Utiliser des modèles positifs*. Le comportement d'apprentissage des jeunes enfants est favorablement influencé lorsqu'ils cherchent à imiter les stratégies méta-cognitives utilisées par leurs éducateurs (par exemple : « Face à quel problème suis-je placé? Qu'ai-je besoin de faire? Comment vais-je m'y prendre? Est-ce que cela a été efficace? Qu'est-ce qui me le montre?). Demander aux enfants de formuler des hypothèses expliquant ce qui se passe les rend plus actifs et plus intéressés (Que penses-tu de cela, et pourquoi?). »
- « *Re-connaître* » (Meade et Cubey, 1995). Mettre des mots sur les actions d'un jeune enfant l'aide à clarifier ses idées et à comprendre les processus à l'œuvre. Réutiliser les expériences concrètes est une partie très importante du rôle des éducateurs de jeunes enfants.
- *Donner des instructions précises*. C'est important dans certains domaines. Par exemple, les recherches sur la littératie semblent indiquer que, vers cinq ans, les enfants ont besoin de construire une conscience phonémique et des connaissances graphophoniques pour ensuite pouvoir apprendre à lire. Les jeux (comptines, tri, chercher l'intrus) permettent de découvrir et d'apprivoiser la notion de répétition. L'importance accordée à l'hygiène et à la sécurité de l'enfant joue également un rôle indéniable.
- *Passer du temps à observer*. Les éducateurs peuvent se mettre à l'écart des activités des enfants, ou y participer, selon le type d'apprentissage en cours. On estime qu'il est important que les enfants contrôlent leur apprentissage tout en étant soutenus et aidés.
- *Favoriser la diversité*. On peut faire découvrir aux enfants d'autres langues ou dialectes, et penser à étudier les choses sous des angles très divers (musique, histoires, jeu, expériences pratiques, dessins, art, logique…), puisque les méthodes d'apprentissages sont nombreuses, et que les enfants accèdent à la compréhension par des moyens symboliques très variés.
- *Centrer l'attention par la reformulation*. Poser des questions, expliquer les choses et établir des liens entre différents éléments sont autant de moyens pour les éducateurs d'aider les enfants à focaliser leur réflexion et à mieux comprendre le monde.
- *Faire en sorte que les enfants soient confrontés à des situations de parole et d'écoute variées*. Cela permet de diversifier les expériences de communication. Certains éducateurs considèrent que c'est un aspect très important de leur travail avec de jeunes enfants.

Ce qu'on sait aujourd'hui du développement cérébral montre à quel point les facteurs biologiques et l'environnement – le contexte d'apprentissage – sont étroitement liés. L'enfant apprend de façon active, et il faut tenir compte de sa famille et de son entourage quand on considère le niveau de développement et les caractéristiques individuelles d'un enfant (Gilkerson, 2001).

A.5. Les défis à relever pour synthétiser les résultats des recherches en neuroscience et en sciences de l'éducation

La neuroscience et les sciences de l'éducation n'ont ni les mêmes buts, ni les mêmes priorités. Les neuroscientifiques commencent seulement à savoir quelles expériences créent tels ou tels réseaux neuronaux. Puisqu'on peut appliquer à l'homme certains des résultats obtenus d'expériences sur les animaux, celles-ci sont à la base de spéculations importantes relatives au fonctionnement du cerveau humain et aux mécanismes d'apprentissage à l'œuvre chez les jeunes enfants. Des technologies récentes permettent d'observer le cerveau humain en activité, mais en déduire des implications pour l'éducation des enfants n'est vraiment pas une science exacte (Frost, 1998, p. 12).

La conception de questions et de méthodes transdisciplinaires permet de mieux comprendre de nombreux mécanismes. Réunir sciences de l'éducation et neuroscience est pourtant loin d'être facile. Ainsi, la notion de « périodes sensibles » du développement cérébral est bien établie, mais ce qu'en concluent la presse généraliste et les décideurs politiques est problématique. C'est ce que Bruer (1999a et b) cite comme exemple de cas où les neuroscientifiques avancent de simples hypothèses, adoptées ensuite sans analyse ni réserves par les spécialistes de l'éducation. Les théories concurrentes à l'intérieur de chaque discipline doivent être soigneusement étudiées pour que la recherche puisse progresser. Enfin, la grande majorité des études sur le rôle de l'expérience dans le développement cérébral se sont surtout intéressées aux enfants maltraités ou négligés. On ne dispose quasiment pas d'études sur des situations saines. Il faudrait étudier des enfants au développement normal – c'est intéressant et utile en soi, et cela permettrait de promouvoir l'importance de la santé et du bien-être (Reid et Belksy, 2002, p. 584).

Pour certains, il est prématuré d'appliquer à l'enseignement les découvertes des neuroscientifiques. Bruer (1999a et b) soutient que l'éducation des jeunes enfants profite davantage de l'*application* des pratiques cognitives que des découvertes neurologiques. On dit aussi que les neuroscientifiques ne connaissent pas assez bien les liens entre fonctionnement neuronal et pratiques éducatives pour pouvoir être utiles aux éducateurs (Winters, 2001, p. 4). La plus grande prudence est effectivement de mise quand on veut appliquer à un contexte éducatif des découvertes neuroscientifiques.

À mesure que les éducateurs élargiront leurs perspectives pour couvrir tous les aspects du développement de l'enfant (en y intégrant la connaissance du cerveau), on comprendra mieux comment les choses se passent (Gilkerson et Kopel, 2004). Les pratiques actuelles évoquées dans cet article se basent surtout sur la tradition, l'expérience et la recherche en sciences de l'éducation. Les pratiques conseillées ne semblent pas contredire les connaissances neuroscientifiques actuellement disponibles. Il faut unifier sciences de l'éducation et neuroscience pour faire progresser les pratiques éducatives en mettant au point des programmes efficaces et bénéfiques.

Nuria Sebastian-Galles et Collette Tayler

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

A.6. Réactions du praticien

Après avoir lu cet article, j'ai pensé que les observations réalisées par la neuroscience, et ce qu'elles indiquent sur les phénomènes éducatifs, permettent de considérer l'éducation à travers les yeux d'un sage ou d'un voyant, d'avoir conscience de tout ce qui se passe dans les organes, les tissus, les cellules, etc., lorsque quelqu'un pense ou agit. La question qui se pose est celle-ci : les résultats obtenus en neuroscience peuvent-ils, comme les avis des sages, influencer utilement l'apprentissage ? Si oui, comment s'y prendre ? et par où commencer ? Sans doute par les soins et l'éducation à la petite enfance.

Les expériences de la petite enfance influencent énormément le reste de la vie. Du point de vue des circuits neuraux, cela implique que les jeunes enfants devraient connaître autant d'expériences multi-sensorielles que possible. En d'autres termes, les pratiques doivent davantage chercher à fournir différents stimuli tactiles, auditifs, gustatifs, visuels et olfactifs, dès six mois – voire plus tôt. La tradition en Inde veut qu'on joue de la musique douce et qu'on fasse écouter des textes de sagesse védique aux femmes enceintes, ce qui aiderait le fœtus à se développer, améliorerait sa vie à venir, et contribuerait à rendre la mère calme et heureuse. Beaucoup de nouveaux-nés réagissent aux sons qu'ils ont perçus durant leur gestation.

Plus tôt les enfants apprennent à contrôler leurs émotions, plus l'apprentissage est efficace. L'acquisition des processus de contrôle peut être facilitée par la pratique du yoga et de la méditation, un système holistique de développement physique et mental. Néanmoins, on ne connaît pas encore assez bien les effets de ces pratiques sur le développement du lobe frontal.

Les expériences répétées conduisent à la myélinisation des synapses concernées. Cela semble montrer qu'il est bon d'exposer bébés et jeunes enfants à des expériences d'apprentissage pertinentes et structurées *via* les activités des crèches, garderies et écoles maternelles. Mais, même si l'on fournit des occasions d'expériences variées, on ne peut pas prédire lesquelles vont attirer chaque enfant. Il faut donc s'intéresser aux différences individuelles chez les très jeunes enfants (avant un an).

Puisque l'expérience a une telle importance, il faut renforcer et améliorer les systèmes d'éducation et de soins aux jeunes enfants, et en créer quand c'est nécessaire, dans le monde entier.

« Selon l'âge et le niveau de développement de l'enfant, l'information sensorielle reçue par le toucher, le goût, l'ouïe, la vue et l'odorat stimule neurones et synapses pour finir par créer des chemins neuraux de plus en plus complexes et sophistiqués qui transmettent, traitent, assimilent et stockent l'information pour un usage présent et futur. Les bébés et les jeunes enfants découvrent le monde *via* des expériences sensorielles variées, qui sont d'une importance capitale pour leur cerveau. Celui-ci change en fonction de l'expérience ; des expériences répétées renforcent les réseaux de neurones. » Cela semble suggérer deux choses : premièrement, plus les expériences sensorielles sont diverses, plus le cerveau va se développer (les synapses seront plus nombreuses et davantage myélinisées). Deuxièmement, plus une expérience est répétée, plus fort sera le réseau neural.

On voit qu'il importe de choisir le bon moment : cela éclaire des concepts bien connus des spécialistes des soins et de l'éducation à la petite enfance. La neuroscience montre qu'effectivement, vient une période où l'enfant est prêt à aller à l'école, prêt à apprendre à lire, etc.

La plasticité. Bébés et jeunes enfants s'adaptent mieux aux nouveautés (qu'il s'agisse de situations, d'expériences ou d'idées) que les adultes. C'est peut-être dû au fait que leurs synapses sont en cours de formation, et qu'ils disposent de davantage de neurones, alors que le cerveau des adultes est moins plastique.

Les périodes critiques ou sensibles du développement neural. Cela est très important pour les capacités, les troubles, les dons et les talents des enfants. Toute une série de questions se posent alors aux scientifiques : peut-on par exemple provoquer un don ? Y a-t-il des moyens de prévenir les troubles de l'apprentissage ? Le talent est-il dû à l'exposition à certains stimuli à des périodes critiques ou sensibles du développement ? L'idée que le génie est héréditaire peut-elle être remplacée par la notion de stimuli appropriés à un moment approprié ?

L'existence pour tous les humains de périodes sensibles, chronologiquement prévisibles mais aux limites imprécises, peut signifier que chaque enfant est un génie potentiel. L'importance des deux premières années de la vie pourrait faire réfléchir sur l'âge d'entrée à l'école maternelle, et éventuellement conduire à le modifier.

L'acquisition du langage est l'une des grandes étapes du développement. La neuroscience confirme ce que d'autres domaines de recherche avaient observé : les jeunes enfants peuvent apprendre toutes les langues avec la même facilité.

C'est bien en forgeant qu'on devient forgeron : le proverbe est vrai au niveau des neurones et des synapses. La réussite des programmes d'éducation pour adultes montre bien qu'on peut apprendre en dehors des périodes sensibles. Le nombre plus restreint de neurones disponibles et le fait que les synapses sont déjà myélinisées peut expliquer que les adultes aient à fournir davantage d'énergie et d'efforts.

Si création de circuits neuraux et myélinisation révèlent l'apprentissage, peut-on dire que la perte de mémoire et l'oubli de choses préalablement apprises sont dues à l'élagage ?

La phrase disant que « l'apprentissage dû à des expériences individuelles nouvelles ou inhabituelles a des conséquences neurologiques tout au long de la vie » rappelle bien que c'est en faisant les choses qu'on les apprend le mieux.

Les *neurones miroirs* semblent montrer qu'on peut apprendre l'empathie grâce à des expériences soigneusement élaborées, ce qui améliorerait le niveau moral de la communauté et de la société au sens large. Aujourd'hui il nous faut être prudents quant à l'impact négatif des tendances antisociales. La recherche sur les neurones miroirs est enthousiasmante et paraît très prometteuse. Peut-on supposer que les professionnels (psychologues, psychothérapeutes, etc.) ne se contentent pas de puiser dans leur formation, mais font appel à leurs neurones miroirs pour comprendre les sentiments d'autrui ?

La découverte des conséquences que les expériences de la petite enfance ont sur le reste de la vie rappelle l'importance des programmes de soins et d'éducation à la petite enfance. Les bébés à qui on lit beaucoup d'histoires acquièrent souvent en grandissant le goût de la lecture, mais ceux à qui on n'en lit pas peuvent malgré tout apprendre à aimer les livres.

L'importance accordée par tous les pays aux programmes destinés aux femmes enceintes, aux bébés et aux mères est tout à fait légitime (vaccins gratuits, campagnes rappelant l'importance des soins, de l'hygiène et de la nutrition pour les futures mères). Après la naissance, on insiste surtout sur l'importance de l'allaitement maternel pendant au moins six mois. La neuroscience permet de mieux comprendre l'importance de la période allant de 6 mois à 3 ans.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Des études portant sur des familles nucléaires ou étendues pourraient permettre de mieux connaître les effets de la *complexité environnementale*.

Plasticité neurale. L'éducation des jeunes enfants n'est pas seule responsable de l'évolution future des enfants, en raison de la plasticité cérébrale; mais il est indéniable que les expériences du début de la vie ont des conséquences réelles. Un programme de soins et d'éducation à la petite enfance bien conçu pourrait permettre d'économiser ultérieurement beaucoup d'efforts et d'énergie, de la même manière que des précautions intelligentes peuvent éviter une maladie ou une catastrophe.

L'apprentissage, élément crucial de la petite enfance. Les pistes qu'explorait la recherche éducative sont à présent soutenues par les découvertes de la neuroscience : c'est là un témoignage constructif.

Les graines de l'intelligence humaine sont pour l'instant considérées comme abstraites, mesurées *via* le quotient intellectuel, le quotient émotionnel et le quotient spirituel. Il faut à présent les étudier en termes de connections synaptiques : un niveau d'étude bien plus profond, mais bien plus concret.

Puisque les circuits neuraux des jeunes enfants peuvent être modifiés, on peut tenter de découvrir des moyens de prévenir les troubles de l'apprentissage ou chercher à mettre au point des interventions efficaces.

La pédagogie ciblée sur les jeunes enfants cherche à développer leur autonomie et à poser des bases solides pour leur vie future. On considère que c'est le bon moment pour encourager une bonne alimentation, un rythme de sommeil adapté et des habitudes d'hygiène corporelle. Selon les découvertes microgénétiques sur l'apprentissage des enfants, les pratiques pédagogiques devraient être davantage l'occasion d'expériences multi-sensorielles et de découvertes. Il faut insister un peu moins sur l'acquisition de l'autonomie et un peu plus sur la compréhension conceptuelle.

Si nous devons *accorder aux interactions adultes/enfants l'importance qu'elles méritent*, il est nécessaire de mieux former les professionnels et de lancer des campagnes visant à améliorer l'opinion que le public a de ces métiers. Il faudra trouver des moyens d'attirer dans ce secteur d'activité des personnes hautement qualifiées.

L'érosion relationnelle renvoie aux enfants victimes de catastrophes naturelles (tsunami, etc.), emprisonnés, réduits en esclavage, touchés par la guerre ou par un accident.

En ce qui concerne les soins et l'éducation à la petite enfance, *il n'y a pas de baguette magique*, mais la recherche permet une avancée importante vers l'établissement de fondations saines et solides.

Les liens subtils entre jeu et apprentissage – Apprendre devrait toujours être un jeu, et plus tôt on commence à jouer, mieux c'est.

L'idée d'utiliser les intérêts de l'enfant et d'exploiter les moments d'apprentissage devrait être étendue au moins jusqu'à la fin de l'école primaire, dans un fonctionnement beaucoup moins formel et moins structuré.

À présent que la neuroscience affirme elle aussi que les enfants sont mieux capables d'apprendre une langue étrangère, il faudrait les mettre en contact avec une langue qui n'est pas leur langue maternelle. Il serait également judicieux de proposer aux enfants de s'exprimer *via* des cours de théâtre.

Pourquoi ne pas engager des personnes bilingues, multilingues ou polyvalentes dans les crèches et les écoles maternelles ?

Il faut fournir un effort important pour mettre au point des formations appropriées pour les professionnels de l'éducation des jeunes enfants, en cherchant à développer talents, centres d'intérêts et compétences nécessaires à ces métiers.

L'importance de l'échange et de la relation. Parents et responsables devraient être mis en garde contre l'utilisation et la réplication de programmes fixes, prédéterminés. Aujourd'hui, les soins et l'éducation à la petite enfance semblent régis par les lois du marché (on obéit aux désirs du client). Les clients – ici, les parents – doivent avoir conscience des conséquences de leurs désirs.

Comment encourager l'apprentissage chez les jeunes enfants. Les stratégies utilisées par les éducateurs peuvent être regroupées comme suit – l'importance accordée à la diversité appartenant à plusieurs groupes :

- Explorer le monde phénoménologique par l'écoute, l'observation et la coordination avec les parents et la famille.
- Le programme – défini afin d'établir une base de connaissances communes, et de célébrer la diversité.
- L'enseignement en classe – *via* des modèles positifs, la re-connaissance, des instructions précises, la remémoration et la reformulation, la célébration de la diversité.
- Développement langagier – facilité si on fait en sorte que les enfants soient en contact avec différentes situations de parole et d'écoute, et en célébrant la diversité.

Toutes ces stratégies peuvent contribuer à former et myéliniser des synapses. Les pratiques éducatives trouvent une explication élégante grâce à la neuroscience.

On doit donner aux *périodes sensibles* la place qui leur est due, grâce à des recherches en pédagogie et en neuroscience. C'est un argument puissant pour financer et soutenir la recherche en sciences de l'éducation dans le monde entier.

Dans les deux domaines, il existe des théories concurrentes. Il faut donc soigneusement réfléchir pour aboutir à un consensus. Cette réflexion pourrait faire émerger de nouvelles idées et des méthodes novatrices.

En plus des études portant sur l'expérience et le développement cérébral chez les enfants normaux, il faut approfondir les recherches cherchant à prévenir les troubles de l'apprentissage.

Il ne me semble pas prématuré d'appliquer à l'enseignement les découvertes de la neuroscience. Les découvertes sont très encourageantes, et semblent corroborer les concepts éducatifs actuels. L'étude des relations entre fonctionnement neurologique et pratiques éducatives évoque souvent la question de l'œuf et de la poule.

Bharti

Références

Ansari, D. (2005), « Commentaries. Paving the Way towards Meaningful Interactions between Neuroscience and Education », Blackwell Publishing, pp. 466-467, *www.dartmouth.edu/~numcog/pdf/Blakemore %20and %20Frith %20Commentary.pdf?sid=587019*.

Barnett, W.S. (1995), « Long-term Outcomes of Early Childhood Programs », *Future of Children*, vol. 5(3), pp. 25-50.

Bauer, P.J. (2002), « Long-term Recall Memory: Behavioral and Neuro-developmental Changes in the First Two Years of Life », *Current Directions in Psychological Science*, vol. 11(4), pp. 137-141.

Blakemore, S.J. et U. Frith (2005), « The Learning Brain. Lessons for Education: A précis », *Developmental Science*, vol. 8(6), pp. 459-471.

Brainard, M.S. et A.J. Doupe (2002), « What Songbirds Teach us about Learning », *Nature*, vol. 417, 16 mai, pp. 351-358.

Brandt, R. (1999), « Educators Need to Know about the Human Brain », *Phi Delta Kappan,* novembre, pp. 235-238.

Brooks-Gunn, J. (1995), « Strategies for Altering the Outcomes of Poor Children and their Families », dans P.L. Chase-Lansdale et J. Brooks-Gunn (éd.), *Escape from Poverty: What Makes the Difference for Children?*, Cambridge University Press, New York, pp. 87-117.

Brooks-Gunn, J. (2003), « Do you Believe in Magic? What we Can Expect from Early Childhood Intervention Programs », *Social Policy Report*, vol. 17(1), pp. 3-14.

Bruer, J.T. (1997), « Education and the Brain: A Bridge too Far », *Educational Researcher*, vol. 26(8), pp. 4-16.

Bruer, J.T. (1999a), « In Search of Brain-Based Education », *Phi Delta Kappan,* mai, pp. 649-657.

Bruer, J.T. (1999b), *The Myth of the First Three Years*, Free Press, New York.

Burchinal, M.R., J.E. Roberts, R.Jr. Riggins, S.A. Zeisel, E. Neebe et D. Bryant (2000), « Relating Quality of Center-based Child Care to Early Cognitive and Language Development Longitudinally », *Child Development*, vol. 7(2), pp. 339-357.

Burchinal, M.R., D. Cryer, R.M. Clifford et C. Howes (2002), « Caregiver Training and Classroom Quality in Child Care Centers », *Applied Developmental Science*, vol. 6(1), pp. 2-11.

Changeux, J.P. et S. Dehaene (1989), *Cognition*, vol. 33, pp. 63-109.

Clark, J. (2005), « Explaining Learning: From Analysis to Paralysis to Hippocampus », *Educational Philosophy and Theory*, vol. 37(5), pp. 667-687.

Crick, F. (1994), *The Astonishing Hypothesis: The Scientific Search for the Soul*, Scribner, New York.

Cunha, F., J. Heckman, L. Lochner et D.V. Masterov (2005), « Interpreting the Evidence of Life-Cycle Skill Formation », IZA Discussion Paper Series, n° 1575, Institute for the Study of Labour, Bonn, Allemagne, juillet.

Davies, M. (2002), « A Few Thoughts about the Mind, the Brain, and a Child in Early Deprivation », *Journal of Analytical Psychology*, vol. 47, pp. 421-435.

Davis, A. (2004), « The Credentials of Brain-based Learning », *Journal of Philosophy of Education*, vol. 38(1), pp. 21-35.

Dunn, J., C. Slomkowski et L. Beardsall (1994), « Sibling Relationships from the Preschool Period through Middle Childhood and Early Adolescence », *Developmental Psychology*, vol. 30, pp. 315-324.

Dyckman, K.A. et J.E. McDowell (2005), « Behavioral Plasticity of Antesaccade Performance Following Daily Practice », *Experimental Brain Research*, vol. 162, pp. 63-69.

Eming-Young, M. (2000), *From Early Child Development to Human Development*, Banque mondiale, Washington, D.C.

Eming-Young, M. (2002), *Early Childhood Development: A Stepping-stone to Success in School and Life-long Learning,* Human Development Network Education Group.

Fagiolini, M. et T.K. Hensch (2000), « Inhibitory Threshold for Cortical-period Activation in Primary Visual Cortex », *Nature*, vol. 404, pp. 183-186, mars.

Frost, J.L. (1998), « Neuroscience, Play and Child Development », article présenté par IPA/USA Triennial National Conference, ERIC Document 427 845, PS 027 328.

Gazzaniga, M. (1998), *The Mind's Past*, University of California Press, Berkeley.

Gilkerson, L. (2001), « Integrating and Understanding of Brain Development into Early Childhood Education », *Infant Mental Health Journal*, vol. 22(1-2), pp. 174-187.

Gilkerson, L. et C.C. Kopel (2004), « Relationship-based Systems Change: Illinois' Model for Promoting the Social-emotional Development in Part C Early Intervention », Occasional Paper n° 5, Erikson Institute, Herr Research Centre.

Gopnik, A., A. Meltzoff et P. Kuhl (1999), *The Scientist in the Crib. What Early Learning Tells us about the Mind*, Harper Collins, New York.

Goswami, U. (2004), « Neuroscience and Education », *British Journal of Educational Psychology*, vol. 74, pp. 1-14.

Goswami, U. (2005), « The Brain in the Classroom? The State of the Art. Commentaries », Blackwell Publishing, pp. 467-469, *www.blackwell-synergy.com/doi/pdf/10.1111/j.1467-7687.2005.00436.x*.

Greenhough, W.T., J.E. Black et C.S. Wallace (1987), « Experience and Brain Development », *Child Development*, vol. 58(3), pp. 539-559.

Greenhough, W.T., T.C. Maddon et T.B. Fleischmann (1972), « Effects of Isolation, Daily Handling and Enriched Rearing on Maze-learning », *Psychenomic Science*, vol. 27, pp. 279-280.

Hancock, L. et P. Wingert (1997), « The New Preschool » [Special Issue], *Newsweek*, 129, 3637, printemps-été.

Hannon, P. (2003), « Developmental Neuroscience: Implications for Early Childhood Intervention and Éducation », *Current Paediatrics*, vol. 13, pp. 58-63.

Heckman, J.J. et L. Lochner (1999), « Rethinking Education and Training Policy: Understanding the Sources of Skill Formation in a Modern Economy », mimeo, octobre.

Ito, M. (2004), « Nurturing the Brain as an Emerging Research Field Involving Child Neurology », *Brain and Development*, vol. 26, pp. 429-433.

Karoly, L.A., P.W. Greenwood, S.S. Everingham, J. Hoube, M.R. Kilburn, M. Rydell, M. Saunders et J. Chieas (1998), *Investing in our Children: What we Know and Don't Know about the Costs and Benefits of Early Childhood Interventions*, RAND, New York.

Karoly, L., R. Kilburn, J. Bigelow, J. Caulkins et J. Cannon (2001), *Assessing the Costs and Benefits of Early Childhood Intervention Programs: Overview and Application to the Starting Early Starting Smart Program*, RAND Publication MR1336, New York.

Katz, L. (2003), « State of the Art in Early Childhood Education 2003 », ERIC Document, n° 475 599.

Kim, K.H.S., N.R. Relkin, K.-M. Lee et J. Hirsch (1997), « Distinct Cortical Areas Associated with Native and Second Languages », *Nature*, vol. 388, pp. 171-174.

Kisilisky, B.S., S.M.J. Hains, A.-Y. Jacquet, C. Granier-Deferre et J.P. Lecanuet (2004), « Maturation of Fetal Responses to Music », *Developmental Science*, vol. 7(5), pp. 550-559.

Koenig, M.A. et P. Harris (2005), « The Role of Social Cognition in Early Trust », *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 9(10), pp. 457-459.

Kolb, B. et I.Q. Wishaw (1998), « Brain Plasticity and Behaviour », *Annual Review of Psychology*, vol. 49, pp. 43-64.

Kuhl, P.K. (2004), « Early Language Acquisition: Cracking the Speech Code », *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 5, pp. 831-843.

Lally, J.R. (1998), « Brain Research, Infant Learning and Child Care Curriculum », *Child Care Information Exchange*, vol. 5, pp. 46-48.

LeDoux, J. (2003), *Synaptic Self: How our Brains Become Who We Are*, Viking Penguin, New York.

Lindsay, G. (1998), « Brain Research and Implications for Early Childhood Education », *Childhood Éducation*, vol. 75(2), pp. 97-101.

Lynch, R. (2004), « Exceptional Returns. Economic, Fiscal, and Social Benefits of Investment in Early Childhood Development », Economic Policy Institute, Washington, D.C.

Meade, A. et P. Cubey (1995), *Thinking Children: Learning about Schemas*, NZCER, W.C.E. et Victoria University, Wellington.

Mitchell, D.E. (1989), « Normal and Abnormal Visual Development in Kittens: Insights into the Mechanisms that Underlie Visual Perceptual Development in Humans », *Canadian Journal of Psychology*, vol. 43(2), pp. 141-164.

Nelson, C.A. et autres (2000), « The Neurobiological Bases of Early Intervention », dans J.P. Shonkoff et S.J. Meisels (éd.), *Handbook of Early Childhood Intervention*, seconde édition, Cambridge University Press, Cambridge, Mass.

NSCDC (National Scientific Council on the Developing Child) (2004a), « Young Children Develop in an Environment of Relationships », Working Paper 1, été, NSCDC, *www.developingchild.net*.

NSCDC (National Scientific Council on the Developing Child) (2004b), « Children's Emotional Development is Built into the Architecture of their Brains », Working Paper 2, NSCDC, *www.developingchild.net*.

NSCDC (National Scientific Council on the Developing Child) (2005), « Excessive Stress Disrupts the Architecture of the Brain », Working Paper 3, été, NSCDC, *www.developingchild.net*.

OCDE (2006), *Petite enfance, grands défis II – Éducation et structures d'accueil*, OCDE, Paris.

Posner, M.J. (2004), « Neural Systems and Individual Differences », *Teachers College Record*, vol. 106(1), pp. 24-30.

Ramey, S.L. et C.T. Ramey (2000), « Early Childhood Experiences and Developmental Competence », dans J. Wolfagel et S. Danzigner (éd.), *Securing the Future. Investing in Children from Birth to College*, Russell Sage Foundation, New York, pp. 122-150.

Reid, V. et J. Belsky (2002), « Neuroscience: Environmental Influence on Child Development », *Current Paediatrics*, vol. 12, pp. 581-585.

Rushton, S. et E. Larkin (2001), « Shaping the Learning Environment. Connecting Developmentally Appropriate Practice to Brain Research », *Early Childhood Education Journal*, vol. 29(1), pp. 25-33.

Rutter, M. (2002), « Nature, Nurture and Development: From Evangelism through Science Towards Policy and Practice », *Child Development*, vol. 73(1), pp. 1-21.

Rutter, M., T. O'Connor et the English Romanian Adoptees Study Team (2004), « Are there Biological Programming Effects for Psychological Development? Findings from a Study of Romanian Adoptees », *Developmental Psychology*, vol. 40(1), pp. 81-94.

Shonkoff, J.P. et D.A. Phillips (2000), *From Neurons to Neighbourhoods: The Science of Early Child Development*, National Academy Press, Washington, D.C.

Shore, R. (1997), *Rethinking the Brain. New Insights into Early Development*, Families and Work Institute, New York.

Siegler, R.S. (2000), « The Re-birth of Children's Learning », *Child Development*, vol. 71(1), pp. 26-35.

Slavin, R.E. (2002), « Evidence-based Education Policies: Transforming Educational Practices and Research », *Educational Researcher*, vol. 31(7), pp. 15-21.

Smith, P.K. et A.D. Pellegrini (2004), « Play in Great Apes and Humans », dans A.D. Pellegrini et P.K. Smith (éd.), *The Nature of Play: Great Apes and Humans*, pp. 285-298.

Sylva, K., E. Melhuish, P. Sammons, I. Siraj-Blatchford et B. Taggart (2004), « The Effective Provision of Preschool Education [EPPE] Project. Final Report », Department for Education and Skills, Londres, Décembre.

Thompson, R.A. et C.A. Nelson (2001), « Developmental Science and the Media. Early Brain Development », *American Psychologist*, vol. 56(1), pp. 5-15.

Thorpe, K., C. Tayler, R. Bridgstock, S. Grieshaber, P. Skoien, S. Danby et A. Petriwskyj (2004), « Preparing for School. Report of the Queensland School Trials 2003/4 », Department of Education and the Arts, Queensland Government, Australie.

Werker, J. et H.H. Yeung (2005), « Infant Speech Perception Bootstraps Word Learning », *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 9, pp. 520-527.

Winters, C.A. (2001), « Brain-based Teaching: Fad or Promising Teaching Method », ERIC Document 455 218, SP 040 143.

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE II

Article B

Le cerveau et l'apprentissage à l'adolescence

par
Karen Evans, School of Lifelong Learning and International Development, Université de Londres, Royaume-Uni
Christian Gerlach, Learning Lab Denmark, Danemark
Réactions : Sandrine Kelner, professeur de lycée, Nancy, France

B.1. Introduction

Le cerveau est un ensemble de cellules appelées neurones, qui en sont les composants élémentaires. Au plus fort du développement cérébral prénatal (entre 10 et 26 semaines après la conception), il se crée environ 250 000 neurones par minute. À la naissance, le nombre de neurones déjà constitués est de 15 à 32 milliards – une grande partie de ceux qui existeront plus tard. Une telle fourchette montre clairement que le décompte est imprécis, mais aussi que le nombre de cellules varie considérablement avec les individus. Après la naissance, les neurones ne sont produits qu'en nombre limité. En revanche, les connexions interneuronales vont considérablement évoluer : certaines se forment, d'autres se renforcent, d'autres enfin disparaissent. C'est cela, bien plus que l'évolution du nombre de neurones eux-mêmes, qui est capital. Les possibilités de modifications sont immenses, étant donné que chaque neurone est souvent connecté à plusieurs milliers d'autres. On a longtemps pensé que ces modifications avaient surtout lieu durant l'enfance, car à six ans le cerveau fait déjà 90 % de sa taille définitive. Aujourd'hui, on a compris que des changements significatifs se produisent tout au long de la vie. Dans cet article, nous nous intéresserons aux changement neuraux durant l'adolescence, c'est-à-dire de 12 à 18 ans environ, et à la façon dont ces changements sont liés à des caractéristiques comportementales telles que la régulation de l'affect, les comportements à risques, les capacités de prise de décision et le développement de l'indépendance. L'objectif est d'étudier les conséquences de ces développements sur l'apprentissage, l'enseignement et l'éducation. Auparavant, nous présenterons les éléments clés du développement cérébral aux niveaux microscopique (neuronal) et macroscopique.

B.2. Le développement cérébral – de quoi s'agit-il?

B.2.1. Le développement cérébral au niveau microscopique

Pour comprendre les différentes étapes de l'évolution du cerveau, il faut un minimum de connaissances quant à sa nature. Le neurone – le plus petit élément fonctionnel – comporte trois parties principales : le **corps**, qui contient les éléments nécessaires à l'entretien de la cellule, un **axone** et plusieurs **dendrites** qui forment des sortes de filament à partir du corps cellulaire. Les dendrites reçoivent des stimuli d'autres neurones, et l'axone leur envoie des stimuli. Un neurone communique avec un autre neurone en libérant par son axone (qui peut avoir plusieurs **terminaux**) une substance chimique (un **neurotransmetteur**). Ce neurotransmetteur franchit alors un petit espace avant d'atteindre les récepteurs à la surface d'une dendrite appartenant à un neurone voisin. La zone où axones et dendrites sont séparés par une petite fente que traversent les neurotransmetteurs est appelée **synapse**.

La communication entre les neurones est modulée par plusieurs facteurs. Le plus évident est la possibilité d'augmenter le nombre de synapses (**synaptogénèse**). Ce nombre peut également diminuer (**élagage**). D'une façon plus subtile, la « puissance » de la communication est régulée : selon la quantité de neurotransmetteurs libérés par les terminaux des axones,

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

selon la vitesse avec laquelle le neurotransmetteur est récupéré dans la fente synaptique, ou encore selon le nombre de récepteurs à la surface du neurone. Ces évolutions-là sont souvent qualifiées de **renforcement** ou d'**affaiblissement** des connexions synaptiques existantes.

Les modifications subies par les neurones sont influencées par l'expérience de l'individu. Il semble s'agir d'une sélection darwinienne (survie du mieux adapté) : les connexions inutilisées s'affaiblissent ou disparaissent, et celles qui sont utilisées fréquemment sont renforcées – ce qui garantit des communications plus efficaces. Cela signifie que l'apprentissage est le fait du développement de nouvelles synapses ou du renforcement ou de l'affaiblissement (voire de l'élimination) de synapses existantes. En fait, on a de bonnes raisons de penser que les deux mécanismes coexistent, le premier étant prédominant chez l'enfant et l'adolescent et le second chez l'adulte. C'est donc l'expérience qui modèle le cerveau.

Les neurones n'évoluent pas seulement *via* les changements synaptiques. Regardons ce qui se passe quand deux neurones échangent de l'information : l'axone d'un neurone libère un neurotransmetteur. Pour cela, l'axone doit recevoir un signal : une impulsion électrique venue du corps cellulaire. Le neurone A libère un neurotransmetteur dans la fente synaptique entre les neurones A et B. Une certaine quantité de ce neurotransmetteur atteint les récepteurs du neurone B de l'autre côté de la fente. Des pompes s'ouvrent dans la membrane du neurone B afin que les substances chimiques présentes dans la synapse puissent pénétrer dans la cellule, et que d'autres en sortent. Si l'influence sur le neurone B est suffisamment forte – si les pompes activées sont en nombre suffisant – le voltage de la cellule va changer en entraînant une réaction en chaîne le long de l'axone. L'axone se comporte donc comme un fil électrique, qui transmet le courant (l'impulsion électrique) plus efficacement (plus rapidement) s'il est isolé. À la naissance, la plupart des axones ne sont pas isolés, mais ils le deviennent avec le temps, lorsqu'une couche de graisse apparaît à leur surface. On appelle ce processus la **myélinisation** (la myéline est la substance graisseuse isolante). Quand un axone est isolé, le courant électrique peut courir entre les couches graisseuses au lieu de se frayer un chemin lentement. Ainsi, les axones myélinisés transmettent l'information jusqu'à 100 fois plus vite que les axones non myélinisés. Comme dans le cas des modifications synaptiques (synaptogénèse/élagage/renforcement/affaiblissement), la myélinisation peut dépendre de l'expérience (Stevens et Fields, 2000).

B.2.2. Le développement cérébral au niveau macroscopique

Les neurones ne sont pas connectés au hasard. L'un des principes de base est que des neurones dédiés à des tâches identiques ou similaires sont situés près les uns des autres, en groupe. Ces groupes sont eux-mêmes connectés à d'autres groupes, de façon que chaque zone du cerveau est connectée directement ou indirectement à beaucoup d'autres, formant un réseau complexe. Bien sûr, cela ne veut pas dire que tous les groupes ont la même fonction. Au contraire, bien des zones du cerveau sont hautement spécialisées et ont des fonctions très spécifiques. Par exemple, certains groupes du cortex visuel traitent la couleur, d'autres groupes distincts traitent le mouvement, la forme, etc. Voir un objet est donc le résultat du travail de plusieurs zones spécialisées qui fournissent chacune un aspect de notre perception. Quand de nombreuses zones cérébrales sont nécessaires à une fonction donnée, on les appelle des **réseaux cognitifs**. Certaines fonctions sont déjà en place à la naissance. C'est probablement le cas pour l'opération qui consiste à segmenter la parole en mots (Simos et Molfese, 1997). (Souvent, les mots sont prononcés les uns à la suite des autres, et déterminer où l'un finit et l'autre commence est une tâche complexe.)

D'autres fonctions doivent être « construites ». La lecture nécessite un réseau complexe qui fait appel à de très nombreuses zones du cerveau. À la naissance, ce réseau n'existe pas. Il doit être formé en connectant et coordonnant les activités de plusieurs zones. C'est entre autre pour cela que pour savoir lire, il faut avoir appris d'une manière explicite, alors que la compréhension du langage parlé semble se produire spontanément.

B.2.3. Le développement cérébral peut être examiné à de nombreux niveaux

Nos connaissances du développement cérébral sur un plan microscopique viennent de l'étude des neurones chez les animaux, qui ne sont pas très différents de ceux des humains. Mais les recherches à ce niveau sont moins éclairantes en ce qui concerne les relations entre les fonctions cognitives et les changements neuraux. En effet, les neurones se comportent de la même façon, et se développent selon les mêmes principes, où qu'ils se trouvent dans le cerveau et même s'ils remplissent des fonctions très différentes. Pour étudier les fonctions cognitives, il faut examiner des zones importantes – voire le cerveau tout entier. De plus, pour comprendre le développement humain, il vaut mieux étudier le cerveau humain plutôt que celui des singes (même quand ils sont très similaires). Jusqu'à ces vingt dernières années, l'étude du cerveau humain se résumait donc à des examens post-mortem. On peut certes apprendre beaucoup en disséquant un cerveau, mais on ne disposait généralement que d'organes de personnes malades ou âgées. Cela limitait l'étude du développement cérébral normal. Cela dit, dès 1901, cette méthode avait déjà permis d'apprendre beaucoup de choses : Paul Flechsig, à la fin du XVIIIe siècle, a étudié le degré de myélinisation de différentes zones cérébrales à différents âges de la vie. Il a ainsi pu cartographier les progrès de la maturation de chaque zone, ce qui fournit des informations très utiles. Par exemple, on s'aperçoit que les zones qui assurent la consolidation des connaissances dans la mémoire à long terme (lobe temporal mésial) parviennent à maturité avant les zones frontales qui s'occupent de la mémoire de travail (la partie de la mémoire à court terme qui manipule activement l'information). Bien que les découvertes de Flechsig aient été confirmées par des études plus récentes, ses cartes laissent beaucoup à désirer. Il serait utile de savoir à quel moment précis de l'ontogenèse (l'histoire du développement de l'individu) les différentes zones sont arrivées à maturité, et à quel moment le développement est achevé. Il serait également intéressant de savoir si les enfants et les adultes (en raison des différences dans leur développement cérébral) utilisent des zones cérébrales différentes pour effectuer une même tâche. Depuis vingt ans, ces informations peuvent être obtenues grâce aux techniques d'imagerie cérébrale (scanners), qui permettent d'examiner le cerveau d'individus en bonne santé – et vivants. Ces techniques sont assez éloignées des méthodes de Paul Flechsig et mettent en évidence d'autres aspects du cerveau; en voici une présentation.

B.2.4. Techniques d'imagerie cérébrale

Les techniques d'imagerie sont de deux types : **fonctionnelle** et **structurelle**. Les techniques d'imagerie structurelle fournissent des images de l'anatomie du cerveau en mettant en évidence la distribution de substance grise (corps cellulaires) et blanche (axones). La plus utilisée aujourd'hui est l'Imagerie par résonance magnétique (IRM). Pour plus de détails sur ces techniques, voir l'encadré B.1.

Les techniques d'imagerie fonctionnelle fournissent, elles, des images de l'activité cérébrale à un moment précis. Elles permettent d'identifier les zones les plus actives dans certaines circonstances, et donc de déduire quelles zones remplissent quelles fonctions. Pour plus de détails sur ces techniques, voir l'encadré B.2.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Encadré B.1. **Le principe de l'IRM**

Le corps humain contient beaucoup d'eau, mais la concentration de celle-ci varie selon le type de tissu. Dans le cerveau on en trouve deux, la substance grise et la substance blanche. La substance grise est constituée de corps cellulaire, et la substance blanche d'axones (qui sont blancs en raison de la substance graisseuse, ou myéline, qui les recouvre). Les principes de l'IRM sont assez compliqués, mais on peut les résumer ainsi : l'eau contient beaucoup d'atomes d'hydrogène, dans lesquels on trouve des protons. Comme ceux-ci sont magnétiques, ils réagissent comme de petites aiguilles de compas, et comme ils sont toujours en mouvement, ils sont tous dirigés dans des directions différentes. Si on les place dans un champ magnétique puissant, tel que celui créé par les scanners IRM, ils s'alignent dans l'axe du champ magnétique. Bien que les protons ne se déplacent plus, ils continuent de tourner sur eux-mêmes à une fréquence connue. Si on leur envoie une onde radio de la même fréquence, ils s'inclinent légèrement en absorbant l'énergie de l'onde. Quand on interrompt la pulsation radio, les protons se réorientent et donc renvoient une onde radio de la même fréquence, qu'on peut détecter grâce à des antennes. L'intensité du signal reçu dépend donc de la concentration de protons, qui n'est pas la même dans la substance grise et dans la substance blanche. Les différences d'intensité peuvent donc être interprétées en images indiquant les zones de substance grise et les zones de substance blanche.

Encadré B.2. **Le principe de la TEP et de l'IRMf**

Quand les neurones sont activés, ils consomment davantage d'énergie. Celle-ci leur est fournie par le sucre, transporté jusqu'à eux par le sang. En mesurant le métabolisme du flux sanguin dans le cerveau, on obtient une mesure indirecte du niveau d'activité cérébrale. La tomographie par émission de positons (TEP) consiste à injecter une substance radioactive qui se fixe au sucre ou se diffuse dans le sang. Les zones du cerveau les plus actives sont celles où le métabolisme et le flux sanguin, et donc la concentration de substance radioactive, sont les plus élevés. En comptant le nombre de traceurs radioactifs, et en traduisant ces chiffres en images, on peut observer l'évolution de l'activation des zones du cerveau à un instant t. Cette technique comporte un aspect gênant, qui est l'injection de produits radioactifs (quoi qu'à petites doses). Il est heureusement possible aujourd'hui de s'en passer : on s'est aperçu que l'IRM pouvait elle aussi mesurer l'influx sanguin dans le cerveau. En effet, le sang oxygéné et le sang désoxygéné n'ont pas le même degré de magnétisation, ce qui signifie que des ondes radio ne leur feront pas émettre le même signal. Puisque les neurones ont besoin d'oxygène pour transformer le sucre en énergie, le signal radio émis par une zone donnée sera différent selon que celle-ci est activée ou pas. En mesurant le rapport entre sang oxygéné et sang désoxygéné, on obtient une indication sur le degré d'activation de la zone. Cette technique de mesure de l'activation par IRM est appelée IRMf (IRM fonctionnelle).

B.2.5. Il est difficile de déterminer le rôle de l'inné et de l'acquis dans le développement cérébral

L'invention des techniques de neuroimagerie a permis de grandes avancées dans ce que nous savons du développement cérébral, puisqu'elles permettent de l'étudier chez des gens vivants et en bonne santé. Nous sommes aujourd'hui à même d'examiner à quel moment différentes zones du cerveau se développent (arrivent à maturité), ainsi que de

découvrir si les enfants utilisent ou non les mêmes zones que les adultes. Avant de nous intéresser à ces découvertes, il est important de mentionner certains des problèmes posés par l'interprétation des résultats.

Jusqu'ici nous avons parlé du développement cérébral comme s'il s'agissait d'un processus unique. Pourtant, il dépend de plusieurs facteurs. Certains aspects du développement sont régis par la génétique, et ne sont pas directement affectés par l'expérience individuelle. Par exemple, ce n'est évidemment pas par hasard si le cortex visuel se trouve au même endroit et est connecté de manière identique chez tous les individus[1]. Ce type de développement est un processus de **maturation** biologique génétiquement déterminé. En revanche, il est patent que certains aspects de l'architecture cérébrale sont profondément dépendants de l'expérience, et donc diffèrent selon les individus. Même les jumeaux monozygotes ont des cerveaux différents (White, Andreasen et Nopoulos, 2002). Le développement cérébral est un produit de la maturation (innée) et de l'expérience (acquise). Il est donc très difficile de déterminer quelles modifications sont causées par la maturation biologique.

Il faut aussi envisager les rapports entre le développement et l'âge. Si nous envisageons le développement cérébral seulement en fonction de l'âge chronologique, nous obtiendrons des mesures imprécises, puisque les différences individuelles influencent le développement. En d'autres termes, même si la zone « x » arrive à maturité avant la zone « y » chez l'ensemble des individus, le moment exact où la zone « x » atteint son plein développement varie selon les gens. Chez l'un, cela se produit vers six ans, alors que chez un autre ce sera à huit ans. Si nous n'étudions que des groupes d'un âge précis, disons 12 ans, nos résultats seront imprécis parce que les différences individuelles parasitent les différences fondamentales. Ce problème se pose dans le cas des **études par échantillonnage** dans lesquelles on compare des groupes d'âges différents. La seule façon d'y remédier est d'étudier le même groupe d'individus à différentes périodes de leur vie. Cela élimine une partie de l'incertitude due à des différences de développement entre des individus d'un même âge. On appelle cela des **études diachroniques**. Celles-ci sont l'exception plutôt que la règle, puisque les techniques de neuroimagerie n'existent que depuis dix ou quinze ans.

Les études diachroniques sont plus précises que les études par échantillonnage, mais ne permettent pas d'éviter le problème crucial de la relation entre développement induit par la maturation et développement induit par l'expérience. Il est difficile de déterminer si un changement survenu chez le même individu entre six et huit ans est dû à l'expérience, à la maturation, ou au deux. En deux ans, l'expérience apporte beaucoup – ne serait-ce qu'à l'école.

En gardant ces problèmes à l'esprit, nous allons nous intéresser à ce que nous savons du développement cérébral ontogénétique.

B.3. L'expérience modèle le cerveau

B.3.1. Activité cérébrale au fil du temps

Beaucoup d'informations sur le développement cérébral viennent d'études du métabolisme cérébral mesuré grâce à la TEP (Chugani et Phelps, 1986; Chugani, Phelps et

1. Ainsi, notre cortex visuel se développe normalement bien que les perceptions visuelles de chacun soient très différentes. Ce n'est que dans des cas très particuliers, comme une cécité totale dûe à un problème oculaire, que ce développement régi par la génétique sera anormal.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Mazziotta, 1987; Chugani, 1998). Ces études fournissent une représentation de l'activité synaptique. Elles montrent que c'est dans la moelle épinière, dans certaines régions du cervelet et du thalamus, ainsi que dans les zones sensorielles et motrices élémentaires, que le métabolisme des nouveaux-nés (avant un mois) est le plus élevé. Cela signifie que les nouveaux-nés sont capables de réguler les fonctions de base comme la respiration, l'excitation (moelle épinière), de percevoir le contact et les impressions visuelles (thalamus et zones sensorielles), et de réaliser des actions élémentaires (zones motrices et cervelet). Leur métabolisme est également assez élevé dans certaines des zones de la mémoire et de l'attention (hippocampe, gyrus cingulaire et ganglions de la base). Vers le deuxième ou troisième mois, le métabolisme augmente dans les zones secondaires et tertiaires des lobes pariétal, temporal et occipital, qui ne reçoivent pas directement de stimuli sensoriels mais *traitent* l'information fournie par les zones primaires. D'un point de vue comportemental, cela indique que l'enfant est davantage capable d'assimiler des informations et de coordonner ses mouvements. Cette augmentation du métabolisme dans les régions secondaires et tertiaires n'est cependant pas uniforme. Ainsi, elle ne se produit à l'avant du cerveau que vers l'âge de six mois. Ce sont les lobes frontaux qui traitent les informations les plus complexes, et sont normalement associés aux fonctions exécutives (c'est-à-dire la capacité de prévoir et de réaliser des actions complexes et préméditées).

Rien de cela n'est très éloigné de ce que décrivait Flechsig en 1901, même si la chronologie est ici mieux prise en compte. Les études par TEP et celles de Flechsig montrent toutes les deux que le développement ontogénétique en général reflète le développement phylogénétique. Mais les études par TEP révèlent un élément surprenant. Alors que le taux de métabolisme des nouveaux-nés est d'environ 30 % inférieur à celui des adultes, il augmente rapidement pendant les quatre années suivantes jusqu'à être deux fois supérieur à celui des adultes. Ensuite, et jusqu'à 9 ou 10 ans, il est stable. Puis il baisse et, vers 16 ou 18 ans, rejoint celui des adultes. Puisqu'il correspond à l'activité synaptique, on voit qu'il y a à 4 ans beaucoup plus de synapses que nécessaire, et qu'elles sont éliminées avec le temps. L'élimination de connexions neuronales superflues est donc un élément normal du développement cérébral. Seules les synapses utiles survivent, et leur utilité est déterminée par l'expérience individuelle (Rauschecker et Marler, 1987). D'un point de vue génétique, c'est l'idéal. Au lieu de prévoir toutes les connexions cérébrales, seules les plus importantes sont données au début. La suite dépend de l'environnement. Ainsi les fonctions cérébrales correspondent aux besoins de l'organisme.

B.3.2. Structure cérébrale au fil du temps

Les recherches mentionnées ci-dessus se basent sur des études TEP de l'activité cérébrale. Mais, même s'il y a un rapport étroit entre le métabolisme et le nombre de synapses en activité, la TEP ne révèle qu'indirectement comment la structure du cerveau évolue avec le temps. Pour des informations plus directes, il faut utiliser l'IRM et observer les modifications de la substance grise et de la substance blanche. Nous disposons aujourd'hui de plusieurs de ces études (voir Durston et autres, 2001; Paus et autres, 2001; Casey et autres, 2005; Paus, 2005).

En général, les résultats obtenus par IRM et TEP sont très proches. Dans l'une des études les plus complètes (Giedd et autres, 1999; Giedd, 2004), basée sur un examen diachronique de plus de 161 personnes, on voit que le volume de substance grise (VSG) évolue suivant une courbe en $\cap$: il augmente durant l'enfance, atteint son maximum à l'adolescence puis diminue. Mais ce n'est pas homogène selon les zones du cerveau. Dans

les lobes pariétaux, le pic a lieu vers onze ans (10.2 ans chez les filles, 11.8 ans chez les garçons), dans les lobes frontaux vers 12 ans et demi (11 chez les filles, 12.1 chez les garçons), et dans les lobes temporaux vers seize ans et demi (16.7 chez les filles, 16.5 chez les garçons). Il est surprenant de noter que le volume de substance grise ne diminue pas dans les lobes occipitaux qui gèrent les fonctions visuelles. On trouve des différences à l'intérieur de chaque région (frontale, temporale et pariétale), parce que la diminution se fait plus tôt dans les zones primaires que dans les autres. Par exemple, la partie dorso-latérale du lobe frontal (associée aux fonctions exécutives), est l'une des dernières à se développer, comme d'ailleurs une partie des lobes temporaux (plus précisément dans les zones latérales, et surtout dans l'hémisphère gauche) (Sowell et autres, 2003) – cette zone joue probablement un rôle particulier dans le stockage de connaissances sémantiques, c'est-à-dire ce que sont les choses, et comment elles fonctionnent (un peu comme un lexique). Que le VSG atteigne son maximum relativement tard dans cette zone (un peu avant trente ans) est cohérent avec le fait que nous acquérons la plupart de nos connaissances sémantiques durant l'enfance, l'adolescence et le début de l'âge adulte.

Il semble globalement que le VSG diminue entre l'adolescence et le début de l'âge adulte. Ce n'est pas le cas du volume de substance blanche (VSB), c'est-à-dire des parties des neurones qui envoient l'information et connectent entre elles les différentes zones du cerveau. Le VSB semble augmenter au moins jusque vers 40 ans (Sowell et autres, 2003), et paraît relativement homogène dans toutes les zones cérébrales (Giedd, 2004).

On peut résumer cela en disant que, avec le temps, nous perdons en plasticité ou potentiel d'apprentissage (diminution du volume de substance grise), mais gagnons en fonctionnalité (les synapses superflues sont éliminées tandis que les canaux de communication sont optimisés, par la myélinisation des axones correspondant à une augmentation du volume de substance blanche).

B.3.3. Les relations entre le cerveau et le comportement doivent souvent faire l'objet de déductions indirectes

Il est indéniable que l'IRM a permis des progrès dans la connaissance du développement cérébral. Mais beaucoup d'études souffrent d'un facteur limitant : elles examinent le développement cérébral seul, et non en parallèle au développement cognitif. Il nous faut donc émettre des hypothèses quant aux changements comportementaux que les changements physiologiques observés peuvent causer. Ces hypothèses peuvent parfois être vérifiées, mais le lien établi reste indirect. Des liens directs ne peuvent être mis en évidence qu'en s'intéressant aux développement cérébral et comportemental chez les mêmes individus au même moment. De telles études sont faisables (Tyler, Marslen-Wilson et Stamatakis, 2005), mais encore rares.

B.3.4. Enfants et adultes n'utilisent pas leur cerveau de la même manière

Les études citées ci-dessus s'intéressent aux changements structurels dans le cerveau en fonction de l'âge. Une autre approche des relations entre fonctions cognitives, développement cérébral et âge est fournie par des **études d'activation** réalisées grâce à des techniques de neuroimagerie (TEP et IRMf). Celles-ci montrent l'activité cérébrale (et non les changements structurels) associée à différentes tâches (lire, reconnaître des objets, etc.). Leur avantage est que les différences entre les groupes (par exemples adolescents/adultes) sont directement liées aux tâches effectuées par les sujets. Ce n'est pas forcément le cas si dans la zone étudiée, le développement cérébral reflète une fonction cognitive. Une

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

corrélation entre la zone A et la fonction B pourrait théoriquement être due à des évolutions de la fonction C si celle-ci se développe comme B au fil du temps. Les études d'activation permettent un contrôle direct de ce phénomène, puisque le chercheur peut décider à quelles fonctions cognitives il veut s'intéresser – en choisissant une tâche appropriée.

Le nombre d'études d'activation s'intéressant aux différences d'âge est largement supérieur au nombre d'études structurelles. Il serait bien trop long de les étudier dans cet article. On peut dire brièvement qu'elles indiquent que les enfants et les adolescents activent davantage de zones du cerveau que les adultes, et que cette activation est plus diffuse (Casey et autres, 2005) – ce qui correspond aux faits : *i)* que les synapses superflues sont éliminées lorsque l'enfant grandit, *ii)* et que la quantité de substance blanche, qui permet une meilleure connexion entre les zones du cerveau, augmente avec le temps. Ces deux éléments penchent en faveur d'un lien direct entre âge du sujet et activation cérébrale plus spécifique.

B.3.5. Cerveau adolescent et modifications du comportement

On voit donc que le cerveau tout entier se développe durant l'adolescence. Mais certaines zones semblent subir des changements plus radicaux à cette période qu'à n'importe quelle autre. C'est le cas des régions dorso-latérales du cortex préfrontal, généralement associées à des processus cognitifs tels que la mémoire de travail (qui manipule activement l'information), l'attribution d'attention, l'inhibition de réactions et la structuration d'actions complexes, délibérées et nouvelles (Fuster, 2002). (Toutes ces opérations sont d'ailleurs étroitement liées.) Il n'est guère surprenant que les capacités exigées par de telles opérations continuent à se développer durant l'adolescence (Keating et Bobbitt, 1978). Plus récemment, on a démontré que ces développements ont une corrélation avec les changements physiologiques (à la fois structurels et fonctionnels) (Casey, Giedd et Thomas, 2000). Les modifications étudiées ici sont très probablement à la base de quatre des caractéristiques séparant les enfants des adolescents, c'est-à-dire la capacité : *i)* de raisonner dans l'abstrait, *ii)* de penser la pensée (méta-cognition), *iii)* de prévoir, et *iv)* de dépasser les limites conventionnelles de la pensée (Cole et Cole, 2001). En conséquence de quoi, vers le milieu de l'adolescence, les capacités de prise de décision atteignent le même niveau que chez les adultes – ce qui ne veut pas dire que les adolescents prennent leurs décisions de la même façon que les adultes. En effet, ils adoptent davantage de comportements à risques, ce qu'on peut relier à un plus grand besoin de sensations et de nouveauté (Spear, 2000). Bien que ces différences comportementales soient probablement liées à des facteurs biologiques, leur lien avec le développement cérébral n'est pas évident, car on les observe également chez d'autres espèces. Les modifications des comportements à risque sont généralement liées aux structures de régulation émotionnelle (cortex préfrontal ventro-médial et amygdale) (Bechara et autres, 1997; Krawczyk, 2002), et le développement cérébral à l'adolescence n'est *a priori* pas lié à ces régions. On peut néanmoins envisager deux facteurs. D'abord, par rapport aux problèmes de prise de décision posés lors des études, ceux rencontrés dans la vie quotidienne ont pour particularité de survenir dans des situations non structurées, caractérisées par l'absence de règles explicites et la multiplicité des solutions possibles. Les capacités décisionnelles au milieu de l'adolescence ont donc pu être surestimées lors des études de développement; peut-être n'atteignent-elles le niveau des adultes qu'à la fin de l'adolescence (c'est-à-dire que les écarts entre capacités décisionnelles et comportement à risque sont peut-être plus faibles qu'il n'y paraît). Si c'est bien le cas, cela corroborerait les études qui indiquent que le développement des zones préfrontales dorso-latérales continue

jusqu'à la fin de l'adolescence. Et puis, il est possible que la diminution de la tendance à prendre des risques (y compris la recherche de sensations fortes et de nouveauté) dépende de la maturation du cortex préfrontal ventro-médial, qui comme on l'a dit est lié à la régulation des émotions. Cette maturation peut passer inaperçue, car cette partie du cortex n'est pas facilement visualisée par IRMf (Devlin et autres, 2000). Quelles que soient les causes biologiques de la tendance à prendre des risques et de la recherche de sensations fortes et de nouveauté, de tels comportements facilitent l'émancipation des adolescents en les poussant à explorer le monde au-delà des limites de leur foyer (Spear, 2000).

B.3.6. Résumé et implications

Bien qu'il soit difficile de déterminer si c'est la biologie (la maturation) ou l'expérience qui détermine le développement cérébral, on observe un schéma global. Les éléments les plus frappants du développement cérébral sont sans doute qu'il continue à l'âge adulte, et qu'il est dynamique. La surproduction de synapses entre la naissance et l'adolescence peut être définie comme un phénomène strictement biologique. Mais l'expérience joue un rôle fondamental, puisque c'est elle qui détermine quelles synapses sont conservées, lesquelles sont éliminées et quels axones sont rendus plus efficaces. Ces « réglages » continuent à l'âge adulte. Il serait faux de penser qu'on ne peut plus apprendre après 30 ans. C'est tout à fait possible; les synapses peuvent être renforcées, affaiblies, et même créées (Draganski et autres, 2004) – quoique sans doute en nombre plus restreint. Ce qui est vrai, c'est qu'on perd en plasticité, le potentiel d'apprentissage que permet la surproduction de synapses. Nous apprenons moins vite, nous sommes moins adaptables. Une consolation pour tous ceux qui ont dépassé la trentaine : nous faisons mieux ce que nous avons déjà appris.

Puisqu'un développement cérébral non négligeable se poursuit pendant l'âge adulte, nous disposons de beaucoup de temps pour que l'expérience (et donc l'éducation) nous apporte connaissances et capacités. Cela ne veut pas dire qu'à la naissance, nous soyons des ardoises vierges; nous sommes « conçus » pour apprendre certaines choses plus vite et plus facilement que d'autres, et nous naissons en disposant déjà de certaines connaissances, et préparés à en acquérir certaines autres[2]. En revanche, cela met en doute l'idée que notre développement est déterminé très tôt dans la vie. Si c'était le cas, pourquoi tous ces changements biologiques jusque dans l'âge adulte? Cela signifie aussi qu'il faut réévaluer la notion de **périodes critiques** qui veut qu'il y ait une fourchette de temps à l'intérieur de laquelle certaines choses **doivent** impérativement être apprises. Aujourd'hui les neurosciences ne disposent de guère d'éléments en faveur de cette idée[3]. S'il faut parler de périodes, on parlera de **périodes sensibles**, c'est-à-dire de périodes pendant lesquelles un apprentissage est optimal, mais qui n'ont rien d'impératif. Un bon exemple de période sensible est qu'il est plus facile d'apprendre une langue au début de la vie plutôt qu'à l'âge adulte. Mais il n'est pas certain que cela révèle une période sensible durant laquelle le développement cérébral et l'acquisition du langage en seraient à un stade clé. On a des raisons de penser que les difficultés rencontrées lors de l'apprentissage d'une seconde langue viennent simplement de ce que nous en connaissons déjà une (notre langue maternelle). Il est probable que l'acquisition de la langue maternelle a préalablement

2. Cette question va bien au-delà du cadre de notre article. Voir Pinker (2002) et Premack et Premack (2003).
3. Excepté des situations extraordinaires. Par exemple, une personne dont les yeux sont bandés dès la naissance jusqu'à l'âge de quatre ans aura vraisemblablement du mal à voir correctement une fois le bandeau retiré.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

influencé (*via* l'élimination de synapses) les zones de notre cerveau qui sont également nécessaires à l'apprentissage d'une seconde langue (Johnson et Munakata, 2005). Ainsi, la perte de plasticité est **une conséquence** de l'apprentissage – la difficulté d'apprentissage n'est pas due à l'expiration d'un délai. Cela dit, il est indéniable que tout ne peut pas être appris avec la même facilité à n'importe quel moment. Nous l'avons vu, il existe des différences de maturation entre les zones cérébrales. De la même manière, il existe des différences individuelles en matière de maturation cérébrale. Il faut donc adapter l'éducation au développement cérébral de chacun – on ne peut pas attendre de quelqu'un qu'il apprenne quelque chose si son cerveau n'y est pas encore prêt.

B.4. Théories de l'apprentissage à l'adolescence et évolution au cours de la vie

Nous avons commencé par exposer les connaissances actuelles sur le cerveau, et l'éclairage que celles-ci peuvent apporter sur le comportement adolescent. Une approche opposée est de considérer ce qui est connu, observé et compris de l'apprentissage chez les adolescents, et de chercher en quoi la recherche cérébrale contribue à l'éclairer. Quand les recherches neuroscientifiques atteignent leurs limites, on peut penser qu'il est nécessaire de convoquer aussi les sciences cognitives, la sociologie et la psychologie évolutionnaire.

On a souvent tenu l'adolescence pour une construction sociale, « inventée » lorsque la puberté est devenue le point de départ d'une période de transition (de plus en plus longue) débouchant sur l'âge adulte, avec ses rôles sociaux et ses attentes. On a ensuite « inventé » la post-adolescence, antichambre de l'âge adulte, qui s'étend jusqu'à environ 25 ans dans beaucoup de sociétés occidentales. On a fini par considérer l'adolescence comme une sorte de « moratoire psychosocial » mis en place par la société, une période destinée à s'entraîner à être adulte dans une société de plus en plus complexe (Cockram et Beloff, 1978). C'est pour des raisons sociales que l'adolescence se termine largement après la « maturité » physique. Les recherches neuroscientifiques ont montré, comme nous l'exposons au début de cet article, qu'il y a des raisons physiques autant que des justifications sociales à la longueur de la période de « transition », puisque le cerveau continue d'évoluer de façon remarquable lors de la troisième décennie de vie, puis dans l'âge adulte.

Au XXe siècle, la vision de l'adolescence était influencée par des théories s'intéressant aux « étapes de la vie », selon lesquelles une période tumultueuse et difficile trouvait sa résolution à la fin de l'adolescence. Ces théories déterminaient des tâches à mener à bien pour trouver stabilité et sens de l'identité : à l'adolescence, il s'agissait de se construire une identité sociale, sexuelle, physique, philosophique et professionnelle (voir aussi Havighurst et Kohlberg à propos des étapes du développement moral). Selon Erikson, l'élément clé de l'adolescence dans « les sept étapes de la vie » était la formation identitaire aux dépends de la confusion identitaire – une opinion encore très présente. L'importance des groupes affinitaires augmente à l'adolescence, en même temps que la quête identitaire (Coleman, 1961; Bandura, 1997).

Les théories socioculturelles ont donné une autre dimension à l'analyse de l'adolescence, en s'intéressant aux structures sociales, aux relations de pouvoir, aux processus sociaux (y compris à l'école et dans la famille) qui influencent les possibilités de choix, et à la relative vulnérabilité de la jeunesse face à ceux-ci. Les métaphores de « trajectoires », répandues dans les années 80 et 90, sont souvent liées à des théories qui insistent sur les effets transgénérationnels des caractéristiques de l'adolescence sur la reproduction socioculturelle des rôles et des possibilités de choix. Ces théories, ainsi que

d'autres qui en sont proches, mettent en avant les réactions d'aliénation et de résistance des adolescents défavorisés sur les plans scolaire, familial et communautaire.

Avec le XXIe siècle sont apparues les métaphores de la « navigation » (Evans et Furlong, 1998), qui tiennent davantage compte de la complexité du parcours de vie et de l'accroissement des « influences secondaires » extérieures à l'entourage direct (famille, école, quartier) de l'enfant. La transition entre l'enfance, durant laquelle l'environnement est contrôlé par autrui, et l'âge adulte, où la volonté propre de l'individu a plus de poids, se complexifie – en raison par exemple du rôle des médias et des moyens de communication modernes. La « théorie focale » de Coleman (1970) critique les théories des « étapes de la vie » en montrant que la « tourmente » de l'adolescence, si elle existe, n'est pas globale, mais que les adolescents sont confrontés à différentes questions à des moments différents. Si des périodes sensibles existent effectivement pour certaines tâches, elles sont propres à chaque individu, se déroulent suivant des modalités différentes, et ne sont pas impératives – on peut effectuer la tâche ou traiter la question même après la fin de la période sensible. L'adolescent, sans avoir totalement résolu une interrogation donnée, se tourne vers la suivante. Les difficultés sont dues à l'interrogation du moment, et les précédentes continuent à le préoccuper – il pourra éventuellement y revenir ultérieurement. Ces théories de la « navigation » insistent aussi sur la façon dont les jeunes gens gèrent le risque et les possibilités qu'ils rencontrent (et qui plus tard seront source de stabilité ou d'instabilité), sur la construction biographique et sur l'« individualisation » (Baethge, 1989; Evans et Heinz, 1994). L'auto-efficacité (Bandura, 1997) et la gestion de soi (Evans, 2002) sont également importantes dans l'apprentissage chez les enfants et les adultes.

Ces théories n'étudient pas directement les processus d'apprentissage, mais renferment nombre de suppositions et d'implications sur le sujet. Les théories de l'apprentissage proprement dites s'inscrivent dans une tradition et éclairent certains aspects de l'apprentissage. Les traditions psychologiques pour lesquelles l'apprentissage est individuel, rationnel, abstrait, détaché de la perception comme de l'action, et déterminé par certains principes généraux ont été mises à mal par des théories socioculturelles de la « cognition *in situ* » selon lesquelles la cognition est essentiellement sociale, concrète, dépendante du contexte et spécifique à un environnement. L'importance pour l'apprentissage de la dimension psycho-dynamique des émotions est de mieux en mieux reconnue, et les sciences cognitives ont permis de mieux comprendre les « intelligences multiples » à l'œuvre dans l'apprentissage individuel et dans l'action humaine (Gardner, 1984; Bruer, 1993).

L'étude du cerveau ne peut ni confirmer ni infirmer ces théories. Nous pouvons néanmoins repérer les points où les sciences sociales débouchent sur des modèles cohérents avec les découvertes dont nous parlons au début de cet article, et les points où elles semblent en désaccord. Dans certains cas, les résultats obtenus par la recherche sur le cerveau peuvent indiquer quelles théories sociologiques il serait le plus utile d'approfondir.

C'est dans une perspective théorique intégrative que les théories du développement de l'adolescent et les questions posées par l'apprentissage à l'adolescence s'articulent le plus efficacement. Ainsi :

1. L'apprentissage est un processus naturel chez l'être humain.
2. Apprendre, c'est bien davantage qu'acquérir des connaissances ou développer des capacités cognitives.

On peut définir l'apprentissage comme l'accroissement des capacités d'un individu. Apprendre implique toujours l'interaction de processus cognitifs et émotionnels, et se

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

déroule toujours dans des contextes sociaux *via* une relation entre les apprenants et leur environnement.

Les sciences sociales ont montré récemment que retenir sur le long terme ce que l'on a appris à un moment donné dépend de l'importance de la chose apprise pour l'individu et de sa motivation. « Le traitement d'un stimulus particulier dépend de ce que notre cerveau juge ou non qu'il est important pour nous. Ce qui préside à la sélection inconsciente de ce qu'on traite et qu'on apprend, c'est notre identité, qui se construit grâce à notre interaction avec le monde » (Hallam, 2005).

La modification des capacités due à l'apprentissage est souvent observable dans le comportement, mais pas toujours. À l'adolescence, elle fait intervenir les dispositions, les orientations, la maturation des fonctions mentales, le développement et la définition de l'identité, les motivations, les stratégies d'accès à l'autonomie et à l'indépendance – toutes choses très sensibles aux influences de l'environnement.

Plusieurs théories formulées par les sciences sociales insistent sur les attributs de cet apprentissage, et montrent que les individus ont des dispositions ou des orientations dans leur rapport au monde qui influencent leur apprentissage. Certaines prédispositions mentales semblent être innées (Pinker, 2002; Premack et Premack, 2003), et sont plus tard modelées par l'expérience. D'un point de vue sociologique, Hodkinson et Bloomer (2002) ont montré que les dispositions socialement construites sont particulièrement importantes pour l'apprentissage chez l'adolescent, puisqu'elles reflètent l'appropriation de cultures, le développement des identités générique, sexuelle et raciale ainsi que l'émergence d'intérêt, de désirs et d'aspirations propres. Par exemple, cette étude a montré que les aspirations professionnelles et l'attitude à l'égard de l'apprentissage à la fin de l'adolescence évoluent d'une façon qui semble liée à l'expérience tout en restant cohérente avec la formation préalable de l'identité. Les dispositions semblent très importantes dans la « carrière d'apprentissage » des adolescents, et contribuent fortement à déterminer s'ils s'impliqueront ou pas dans l'apprentissage formel; pourtant, les questions de culture et d'identité sont souvent négligées dans l'enseignement secondaire et supérieur.

Les sciences sociales ont également montré qu'une grande part de l'apprentissage se fait de manière inconsciente, et que des savoir-faire et des connaissances « invisibles » sous-tendent les comportements, les actions et les performances de chacun dans toutes les situations de la vie. L'apprentissage conscient est en permanence accompagné d'un apprentissage tacite. L'apprenant doit reconnaître les dimensions tacites de l'apprentissage avant de pouvoir les contrôler et les utiliser délibérément (Evans et autres, 2004; Illeris, 2004). Il est probable que cette capacité augmente avec le temps, à mesure que les capacités métacognitives (penser la pensée) apparaissent chez l'adolescent (et continuent à croître chez l'adulte). L'importance de l'apprentissage préalable et le développement de la métacognition à la fin de l'adolescence semblent confirmer les découvertes neuroscientifiques concernant la nature et le rythme du développement des différentes régions du cerveau, et le processus de « modelage » décrit plus haut.

Depuis les travaux de Piaget (1967) et de ses successeurs, on connaît le processus de maturation à l'œuvre dans l'apprentissage. Des recherches plus récentes ont montré que les fonctions mentales supérieures se différencient graduellement à l'adolescence, lorsque la pensée logique et déductive ainsi que la capacité cognitive se développent. On sait que les processus émotionnels et cognitifs sont étroitement liés (Damasio, 1994), même si le comportement plus « mûr » des adolescents vient du fait que leur cerveau est mieux isolé

et d'une plus grande expérience du monde. Ici aussi, il est difficile de faire la part de l'inné et de l'acquis. L'apparition de fonctions cognitives supérieures est également cohérente avec l'évolution du volume de substance grise et du volume de substance blanche à partir de l'adolescence.

Nous savons à présent que le développement cérébral de l'individu reflète ses expériences d'apprentissage et les activités qu'il pratique, que l'intensité du changement dépend du temps passé à apprendre, et que des changements significatifs, permanents et spécifiques dans le fonctionnement cérébral surviennent quand un temps considérable est consacré à l'apprentissage et à la pratique d'une méthode ou d'un savoir-faire. Ainsi, la comparaison de l'activation cérébrale d'apprenants de 13 à 15 ans sachant jouer de la musique, et d'autres n'ayant jamais appris, a conduit Altenmuller et autres (1997) à conclure que le cerveau reflète la « biographie d'apprentissage » de chaque individu – pas seulement ce qu'il a appris, mais la façon dont il l'a appris.

Les biographies d'apprentissage sont uniques et propres à chacun, mais on y trouve certains éléments récurrents. Les « schémas mentaux », selon les psychologues, sont flexibles chez les enfants et se figent à l'âge adulte (Illeris, 2004). On peut relier cela aux notions plus anciennes d'intelligence « fluide » de l'enfant et « cristallisée » de l'adulte, en précisant que l'apprentissage par l'expérience et la capacité à établir jugements et décisions sont des éléments fondamentaux pour différencier adolescents et adultes (Davies, 1971). À l'adolescence, les schémas mentaux se font moins flexibles et les défenses identitaires jouent un plus grand rôle – et peuvent limiter l'apprentissage. Cette idée d'intelligences « fluide » et « cristallisée » corrobore les découvertes neuroscientifiques relatives au volume de substance grise, au nombre de zones actives dans le cerveau, et la qualité diffuse ou focalisée de cette activation selon les âges.

La littérature de l'expertise éclaire également l'apprentissage vu comme développement des capacités d'un individu. Pour passer du premier contact à la compétence puis à la maîtrise (voir Alexander, 2003), il faut une motivation personnelle de plus en plus grande qui permet d'approfondir l'apprentissage (Entwhistle, 1984; Hallam, 2005).

Csikszentmihalyi (1996) a travaillé sur un autre aspect de la progression vers la « maîtrise ». Il a observé que l'expérience du « flux » survenait chez les adolescents lorsqu'ils étaient fortement impliqués dans une activité donnée. Quel que soit la nature de celle-ci, cet « état de flux » consiste en une excitation mentale et intellectuelle, la « suractivation mentale » de qui vise à la compétence et à la maîtrise. Csikszentmihalyi émet donc l'idée que le goût pour la compétence est un trait évolutionnaire favorable. D'autres études corroborent cette hypothèse en montrant que c'est lorsque l'apprentissage s'appuie sur des éléments difficiles et intéressants (pour l'individu) qu'il est le plus efficace. Émotions et développement des capacités seraient donc étroitement liées.

Pour durer, l'intérêt doit être internalisé et devenir partie intégrante de l'identité. L'adolescence étant une période critique de la formation de l'identité, la phase d'« identification » à certains domaines de l'apprentissage a souvent lieu à ce moment-là (Hallam, 2005). Ces éléments contribuent au développement d'un désir de contrôler l'apprentissage, qui dans ce domaine constitue la différence fondamentale entre enfants et adultes. Les théories de l'apprentissage chez les adolescents expliquent que ceux-ci cherchent à exercer un contrôle sur eux-mêmes et leur environnement; c'est un corollaire de la formation identitaire, c'est-à-dire la prise de conscience de qui ils sont, de la façon dont ils sont perçus (et veulent être perçus) par les autres.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Erikson (1968) a formulé l'idée que la formation identitaire atteint une étape critique à l'adolescence, puisque c'est à ce moment-là que l'individu doit faire face à la confusion identitaire pour déterminer « qui il est » : idée très importante pour l'apprentissage, puisque l'identité est un facteur capital de la motivation, et puisqu'un réflexe de défense identitaire est souvent à la base d'une résistance ou d'un refus face à l'apprentissage. Puisque les grandes différences entre enfants et adultes face à l'apprentissage viennent du degré de contrôle que l'apprenant exerce sur la situation, ainsi que des connaissances et capacités déjà acquises, la quête de l'autonomie à l'adolescence est d'une importance fondamentale, autant pour l'apprentissage lui-même que pour la façon dont l'adolescent construit son apprentissage en interaction avec l'environnement social. Ce processus est lui aussi cohérent avec l'émergence, à la fin de l'adolescence, d'une meilleure capacité à résoudre les problèmes et à prendre des décisions. Cette capacité continue à se développer à l'âge adulte; d'ailleurs, on a vu que les zones cérébrales concernées (cortex préfrontal) arrivent à maturité plus tardivement.

La quête d'autonomie et d'indépendance, conjointement au processus de formation identitaire, est généralement associée à des comportements d'expérimentation et de prise de risques, qui peuvent eux-mêmes conduire à développer des capacités et constituer un apprentissage important. On a pu suggérer que l'adolescence est une période « sensible » pour ce type d'apprentissage, puisqu'à ce moment-là les liens familiaux se « rompent », ce qui permet l'émergence de la personnalité. Comme on l'a vu plus haut, les recherches en neurosciences disposent de peu d'élément corroborant cette hypothèse, mais la tendance à s'éloigner du groupe originel est sans doute davantage du ressort de la psychologie évolutionnaire. Il est probable que, même si l'adolescence est la période « sensible » pour ce type d'apprentissage, on peut sans dommage majeur le transférer à une période ultérieure étant donné le degré de plasticité conservé tout au long de l'âge adulte.

B.4.1. Implications pour l'enseignement et l'apprentissage à l'adolescence

On a dit jusqu'ici que les capacités des individus changent considérablement comme ils passent de l'enfance à l'adolescence puis à l'âge adulte, et qu'elles sont très influencées par des interactions avec l'environnement social au sens large. Les résultats obtenus en sciences sociales et les recherches des neurosciences – ce qu'on apprend, et la façon dont on l'apprend, modèle le cerveau – vont dans le même sens. On a également étudié la question de savoir si l'adolescence peut être considérée comme une période critique pour le développement de l'autonomie et du contrôle, avec pour conséquence une plus grande indépendance de l'adolescent par rapport à sa famille.

Selon certains – par exemple l'équipe du projet « 21st Century Learning » au Royaume-Uni –, ces découvertes indiquent déjà les grands tournants que doit prendre la société dans l'organisation de l'enseignement et de l'apprentissage à l'adolescence. L'école, disent-ils, doit « respecter la nature du cerveau ».

Sylvester, lui, explique (1995) que le modèle d'Edelman qui décrit le cerveau comme une jungle labyrinthique, riche et désordonnée implique peut-être que la salle de classe idéale serait elle aussi une jungle « dotée de nombreux éléments sensoriels, culturels, intellectuels étroitement liés à l'environnement dans lequel nous vivons – celui qui est le mieux à même de stimuler des réseaux de neurones génétiquement programmés pour ce type de milieux ».

Il est fondamental de considérer les liens entre motivation et apprentissage. Là se trouvent beaucoup des défis à relever dans l'organisation actuelle de l'enseignement

secondaire de la plupart des pays développés. Nous avons vu que la motivation pour apprendre est étroitement liée à l'identité et aux buts que les gens se fixent. Le désir d'apprendre une chose précise dépend du rapport qu'elle entretient avec cette identité et ces buts au moment concerné, ce qui pose un problème quand le programme est fixé d'avance et quand il n'a que peu de rapports avec les buts personnels de l'adolescent. Plus étroits sont les liens entre les buts des enseignants, des apprenants et des systèmes éducatifs, plus efficace est l'apprentissage, explique Hallam (2005). Et plus cet apprentissage est connecté aux divers stimuli de « l'environnement extérieur », plus il est motivant.

Selon les éléments dont nous disposons, quels changements semblent nécessaires pour accorder l'apprentissage à l'adolescence avec « la nature du cerveau »?

1. Repenser l'apprentissage comme le développement des capacités humaines tout au long de la vie, en comprenant que l'évolution du cerveau à l'adolescence est au moins aussi importante que durant la petite enfance. Un système éducatif basé sur la sélection progressive selon les « capacités » à différents âges est en contradiction avec ce que nous savons aujourd'hui sur la façon dont ces capacités se développent. Ce qu'il faut, c'est une éducation tout au long de la vie.
2. Faire en sorte que les apprenants cherchent à améliorer leurs propres performances, ou celles de leur groupe, sans établir de comparaison avec les progrès des autres. D'ailleurs, il peut y avoir des variations considérables quant au niveau de maturité cérébrale entre les individus dans une classe ou un groupe d'âge donné. Les principes d'apprentissage cognitifs peuvent être mieux suivis. Les apprenants progressent grâce à l'aide apportée par leurs professeurs, qu'on aide à leur tour à fournir les encouragements et le soutien informel nécessaires.
3. Tenir compte de ce que les jeunes croient savoir du cerveau et de l'intelligence. Ils sont nombreux à penser que celle-ci est fixée une fois pour toute, immuable. Dweck et Leggett (1988) ont montré que les enfants qui croient cela sont davantage susceptibles de chercher à « être meilleurs que les autres », alors que ceux pour qui l'intelligence est « incrémentielle » cherchent surtout à améliorer leur maîtrise de savoirs ou de savoir-faire. Les jeunes pour qui l'intelligence est « fixe » ont tendance à consacrer moins de temps à leurs devoirs – puisqu'ils pensent que les compétences sont innées –, à éviter les activités qu'ils pensent ne pas réussir, à fournir peu d'efforts dans les domaines où ils sont les moins performants, et à considérer qu'être « bon dans une matière » signifie qu'ils n'ont pas à la travailler (Hallam, 2005).
4. Prendre conscience du fait que catégoriser les gens selon leur « façon d'apprendre » limite l'apprentissage au lieu de le favoriser. Les recherches de Coffield (2004) sur les façons d'apprendre mettent en évidence plusieurs faiblesses dans les catégories actuellement utilisées, ainsi que les risques créés par leur application non réfléchie.
5. Construire l'apprentissage progressivement, sur des éléments déjà acquis, pour améliorer le niveau de compétence et de maîtrise. Le fonctionnement actuel de bien des systèmes scolaires ne répond pas à ce besoin, puisqu'il introduit des ruptures de rythme durant l'adolescence. Cela peut nettement handicaper les progrès.
6. Offrir aux adolescents une palette de perspectives liées à l'expérience et à différentes façons d'apprendre, afin d'améliorer leur capacité de résolution de problèmes et de prise de décisions. C'est valable même au début de l'âge adulte. Une telle variété ne doit surtout pas exclure des activités très ciblées qui permettent et encouragent « le flux ». Il faudrait

permettre de tels apprentissages jusque dans la troisième décennie de la vie, non seulement pour les étudiants mais aussi pour les jeunes adultes entrés dans la vie active.

7. Donner bien plus de poids aux activités extra-scolaires. Une bonne partie des « états de flux » et du plaisir d'apprendre ont pour l'instant lieu hors des contextes formels d'apprentissage, et les adolescents qui « échouent » à l'école peuvent très bien (c'est souvent le cas) construire leur identité et obtenir de la reconnaissance grâce à des activités moins académiques. L'importance que les professeurs donnent aux activités extra-scolaires et optionnelles est cruciale. Cette possibilité devrait être offerte à tous, et pas uniquement aux adolescents favorisés. Mieux encore, l'apprentissage est optimisé quand l'expérience acquise grâce à ces activités optionnelles est reconnue par l'apprenant et ses professeurs, et utilisée en classe afin que les connexions soient consolidées et multipliées.
8. Laisser aux adolescents le choix de ce qu'ils apprennent et de la façon dont ils l'apprennent, à chaque fois que c'est possible et que cela respecte la nécessaire variété d'expériences et de perspectives.

Hallam suggère aussi que les responsables pourraient améliorer la motivation – et donc l'apprentissage – en :

- Évitant de surcharger les programmes scolaires.
- Fixant des tâches stimulantes mais pas trop difficiles.
- Tenant compte des écarts dans les connaissances et l'expérience préalablement acquises.
- Évitant de fixer des attentes selon les « capacités ».
- Encourageant les élèves à prendre en charge leur apprentissage, tout en sachant que cette responsabilité s'apprend et ne peut être confiée à des enfants.

B.5. Défis et pistes à venir

Cette dernière section cherche à :

1. Lister les lacunes des connaissances actuelles; ce que l'on sait, ce que l'on ne sait pas, et ce qu'il importe aujourd'hui de chercher à savoir.
2. Étudier la possibilité d'une synthèse entre la recherche neuroscientifique, les sciences cognitives, d'autres sciences sociales et la psychologie évolutionnaire pour déterminer dans quelle mesure l'apprentissage à l'adolescence est un élément clé dans une étape importante de la vie.

Nous avons déjà montré que, bien qu'il soit difficile de déterminer les effets respectifs de la maturation et de l'expérience, un schéma général émerge :

- Le développement cérébral est un processus dynamique qui se poursuit à l'âge adulte.
- Le rôle de l'expérience est crucial parce qu'elle « modèle » et « programme » le cerveau, y compris à l'âge adulte (même si la flexibilité est alors moindre).
- La « plasticité » du cerveau diminue avec l'âge, mais la maîtrise de ce qui a été appris, elle, augmente.
- Certaines prédispositions existent déjà à la naissance, mais plusieurs éléments mettent fortement en doute l'idée que notre développement est déterminé très tôt dans la vie.
- C'est apparemment vers la fin de l'adolescence que le cerveau commence à être capable de s'auto-contrôler, et de réfléchir à des comportements, et la zone du cerveau correspondante (les parties dorso-latérales des lobes frontaux) arrive à maturité plus tard.

- Il existe peu d'éléments en faveur de la notion de « périodes critiques ».
- Les « périodes sensibles », elles, existent probablement, et sont idéales (mais pas décisives) pour le développement de capacités précises.
- Le développement cérébral varie considérablement selon les individus.

Les schémas généraux sont très clairs, mais on dispose aujourd'hui de peu d'études diachroniques s'intéressant à l'évolution du même groupe d'individus durant l'adolescence et le début de l'âge adulte. Il en faudra davantage pour préciser ces schémas généraux. D'autre part, une grande partie de ce qu'on sait sur les rapports entre développement cérébral et comportement repose sur des interprétations *a posteriori* : on observe des modifications du cerveau, puis on essaie de les relier à ce qu'on sait déjà sur le comportement. À l'avenir, il faudra étudier simultanément les modifications du cerveau *et* du comportement pour mettre au jour des liens solides.

Nous nous sommes tournés vers les sciences sociales en étudiant ce qu'on sait, ce qu'on observe et ce qu'on comprend de l'apprentissage chez les adolescents, puis en réfléchissant sur la façon dont les recherches en neurosciences peuvent enrichir cette compréhension. Selon nous, elles ne peuvent confirmer ni infirmer les théories de l'apprentissage. Néanmoins, nous avons identifié des points d'accord et de désaccord entre les découvertes des neuroscientifiques et les théories sociologiques, et avons abouti à des conclusions quant aux éléments de ces théories qu'il serait le plus utile d'approfondir.

Les découvertes neuroscientifiques confirment le bien-fondé d'une approche intégrative de l'apprentissage, qui prend en compte les différences individuelles dans l'augmentation des capacités humaines. Ces capacités sont modelées et construites en interaction avec l'environnement social, tout au long d'une période qui commence dès la naissance et se poursuit jusque dans l'âge adulte. À l'adolescence, le développement de fonctions cognitives supérieures, de comportements autoréfléchis ainsi que la formation identitaire sont des éléments centraux de ce processus d'apprentissage à long terme.

Les neurosciences nous éclairent quant au fonctionnement du cerveau. Les sciences cognitives ont essayé de modéliser le traitement de l'information et les divers processus d'apprentissage. D'autres branches des sciences sociales s'intéressent aux processus sociaux en jeu dans l'apprentissage et le développement des capacités humaines. L'anthropologie et la psychologie évolutionnaire étudient comment (et pourquoi) l'esprit humain a évolué comme il l'a fait. Une meilleure intégration de ces deux dernières disciplines dans le travail d'analyse apporterait sans doute une partie des chaînons manquants. Nous avons déjà avancé l'idée, par exemple, que des mécanismes d'adaptation (au sens évolutionnaire) puissent expliquer le goût des adolescents pour les comportements à risque. Il est certain en tout cas qu'un apport transdisciplinaire est nécessaire pour faire avancer chacune des disciplines.

Il semble certain aujourd'hui que l'éducation et la façon dont l'enseignement est organisé gagneraient beaucoup à suivre la façon dont les capacités humaines se développent « naturellement », et maturent en interaction avec l'environnement physique et social. Beaucoup d'idées préconçues concernant les « aptitudes » doivent être remises en question. À l'adolescence, cela implique de porter une plus grande attention aux connaissances et à l'expérience déjà acquises, de promouvoir l'autonomie et la responsabilisation quand l'adolescent y est prêt, et de reconnaître que le développement de capacités nouvelles se poursuit bien après la fin de l'adolescence. À l'avenir, le plus grand défi à relever est la création d'une vraie réflexion transdisciplinaire.

Karen Evans et Christian Gerlach

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

B.6. Réactions du praticien : J'ai fait un rêve

J'ai passé beaucoup de temps à enseigner, en France mais aussi dans d'autres pays, surtout à des adolescents mais aussi à des enfants et à des adultes. J'ai passé beaucoup de temps à lire les instructions officielles et à suivre des formations. J'ai passé beaucoup d'heures à étudier les sciences de l'éducation, les sciences sociales, la psychosociologie, et toutes les « -ologies » possibles et imaginables. Durant toutes ces années, j'ai rêvé d'une nouvelle façon de considérer les apprenants. J'ai des idées très claires quant à ce que l'enseignement et l'école devraient être – et soudain cet article surgit… Des pages claires et concises qui résument et prouvent scientifiquement la plus grande partie de ce que je pense depuis des années sur la façon d'enseigner à des adolescents.

Ma réaction a été double : d'un côté, cet article me conforte dans mes positions relatives à l'éducation et à l'apprentissage, mais de l'autre je me suis demandé, amère, combien de temps il faudrait pour que nous puissions commencer à travailler sur de telles bases.

Mon rêve n'est donc toujours qu'un rêve, mais à présent je crois que j'avais raison. Et les connaissances scientifiques actuelles me poussent à davantage m'exprimer sur le sujet. Je crois qu'il nous faut changer de regard sur nos élèves, et sur l'enseignement lui-même. Nous aurons peut-être à définir de nouveaux buts, de nouvelles missions et de nouvelles méthodes d'évaluation. Je ne dis pas que tout doit changer; mais nous (la communauté éducative) devons changer la façon dont nous considérons nos élèves, quel que soit leur âge.

B.6.1. Un nouveau regard sur l'enseignement

Pourquoi?

Nous tenons beaucoup plus compte que naguère de la personnalité des apprenants, mais il reste des efforts à faire dans ce domaine. Les enseignants considèrent toujours qu'ils ont en face d'eux un groupe de gens qu'il faut préparer à un examen, et qui doivent être prêts à répondre à des questions (parfois difficiles) pour prouver leurs connaissances. Il est évident que parfois les élèves utilisent des connaissances apprises par cœur mais n'en comprennent pas vraiment le sens, et seraient donc incapables d'utiliser ce savoir dans d'autres circonstances. C'est pour cela que je suis persuadée que nous persistons à leur faire ingurgiter des leçons sans nous préoccuper de ce qu'ils sont prêts à apprendre, ni de ce qu'ils souhaitent apprendre.

En considérant, comme il est dit dans cet article, que :

1. « L'apprentissage est un processus naturel chez l'être humain » (section B.4 ci-dessus), nous devrions nous demander pourquoi les adolescents n'aiment pas l'école et comment les réconcilier avec le processus d'apprentissage.
2. « Apprendre, c'est bien davantage qu'acquérir des connaissances ou développer des capacités cognitives » (section B.4 ci-dessus), il est indéniable que l'enseignement ne se résume pas à accumuler leçons et exercices (même si on les appelle « activités ») pour respecter un programme chargé en vue de réussir un examen.

L'enseignement ne devrait pas se cantonner au contenu; il faut lui donner du sens. Personne ne peut apprendre quelque chose qui n'a pas de sens, surtout pas des adolescents. Certes, les programmes ont toujours du sens et leur progression est cohérente, mais il faudrait permettre aux adolescents de s'en rendre compte.

Karen Evans et Christian Gerlach disent que « (l'apprentissage) se déroule toujours dans des contextes sociaux *via* une relation entre les apprenants et leur environnement », ce qui implique que nous devrions toujours ramener ce que nous enseignons à un élément concret, quelque chose qui concerne les adolescents et qui leur fera mieux comprendre la société dans laquelle ils vivent : eux-mêmes; leurs amis, leur famille; l'école; l'environnement professionnel; la société; la vie.

J'ajouterais que cette relation ne peut s'établir si les élèves ne comprennent pas clairement ce qu'ils apprennent.

Les concepts abstraits sont bien mieux compris s'ils reposent sur des explications et des faits concrets. Par exemple, *Le Monde de Sophie* de Jostein Gaarder est un bon moyen de leur faire accéder aux concepts philosophiques.

Chaque matière enseignée utilise un vocabulaire bien spécifique – un jargon – que les élèves doivent assimiler. Il leur faut donc apprendre à la fois les mots et les notions qu'ils recouvrent. Ce n'est pas impossible, à condition 1) qu'on utilise pour commencer des mots clairs et connus de tous, et 2) qu'ils n'aient pas trop de nouvelles notions à intégrer dans la même journée.

Je crois qu'à cause de programmes trop chargés, les enseignants n'ont pas (ou ne prennent pas) le temps nécessaire pour faire comprendre les notions complexes. Ils les expliquent une fois en classe, et attendent des élèves qu'ils travaillent chez eux pour les comprendre, les assimiler et les digérer. Mais la question que les professeurs devraient se poser est la suivante : l'adolescent moyen est-il capable de faire cela de lui-même, aura-t-il l'envie et la motivation nécessaires, alors que tant d'expériences sociales l'attendent après la fin des cours ?

Les professeurs ont sans doute tendance à oublier (ou à minimiser ?) la place qu'occupent les autres matières dans l'emploi du temps des élèves (il y en a parfois plus d'une dizaine, même si cela varie selon les pays). Nous savons que le cerveau des adolescents dispose d'un énorme potentiel d'apprentissage, mais je ne pense pas que notre système d'enseignement et d'évaluation actuel les aide à en tirer le maximum.

Comment ?

Il faudrait déjà insister bien davantage sur la méthodologie. Nous estimons souvent que, parce qu'ils sont déjà grands, les adolescents sont capables de travailler seuls. Mais où et quand apprennent-ils à apprendre ? On le leur explique souvent, mais je crois qu'il faudrait le leur montrer.

Je ne dis pas qu'il faudrait travailler à leur place; mais le programme pourrait comporter une progression qui leur ferait découvrir chacune des étapes d'un apprentissage autonome.

- Cela implique d'abord que tous les professeurs aident leurs élèves à se poser les questions suivantes : Pourquoi est-ce que j'apprends cela ? Pourquoi est-ce important pour moi ? Comment cela s'intègre-t-il dans ma vie quotidienne ? Quand, comment et pourquoi cela me sera-t-il utile ?, puis à y trouver des réponses. Et si le sujet ne concerne pas directement la vie de l'élève, en quoi se rattache-t-il à un autre sujet ? En fait, toute explication peut être satisfaisante si les élèves la comprennent.
- Il faut ensuite réfléchir à la façon d'apprendre tel ou tel sujet. Les professeurs devraient guider les élèves et leur montrer (en le faisant avec eux sur une longue période)

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

comment toujours revenir sur ce qu'ils ont fait, le relier à des éléments déjà étudiés ou des choses vécues, et les aider à voir et à ressentir la progression naturelle de la leçon dans son ensemble.

Guider les élèves dans leur travail leur montre aussi que tout le monde n'acquiert pas tout du premier coup, et que l'apprentissage peut prendre du temps. Combien d'adolescents sont capables de travailler sur quelque chose qu'ils ne comprennent pas, et persistent jusqu'à comprendre seuls ? Très peu. Ils ont besoin de sentir que les enseignants les accompagnent – sans pour autant travailler à leur place – jusqu'à ce qu'ils aient atteint leurs buts communs. Les enseignants ont besoin de leur donner le temps, de prendre leur temps, et de pouvoir le prendre.

Dans une période de la vie où le cerveau est particulièrement adapté à l'apprentissage cognitif, je pense que les professeurs ont un rôle capital à jouer en guidant son élaboration.

Je suis convaincue que le travail sur la méthodologie est l'une des façons d'améliorer le processus d'apprentissage. De plus, si les élèves comprennent comment apprendre, leurs professeurs auront bien employé leur temps au lieu de le gaspiller en vain. Ils auront aidé les élèves à développer des capacités d'apprentissage qui leur serviront toute leur vie, et leur auront sans doute permis d'avoir plus confiance en eux-mêmes.

Il faut également prendre en compte la motivation. Nous savons bien que les adolescents s'intéressent plus aux interactions sociales au sein de leur groupe qu'à l'acquisition de connaissances scolaires. Mais être conscient de ce fait ne résout rien. Nous savons également qu'ils sont extrêmement curieux. Pourquoi les enseignants utilisent-ils si rarement cette curiosité pour faire naître la motivation et amener leurs élèves à travailler différemment ?

Je crois qu'une fois encore les responsables sont le manque de temps et les programmes scolaires trop chargés. Il serait sans doute bien plus intéressant et plus constructif que les adolescents participent activement à des projets leur permettant d'aborder les sujets enseignés. Contrairement aux apparences, la plupart des adolescents aiment les défis – s'ils ne sont pas trop difficiles à relever – et souhaitent (parfois inconsciemment) prouver qu'ils sont capables de bien faire.

Quelle que soit la matière concernée, il y a toujours une façon d'atteindre des objectifs scolaires formels *via* des tâches informelles et non typiquement scolaires.

Demander aux élèves de choisir un sujet ou un projet en rapport avec le programme, et leur en confier la responsabilité depuis la conception jusqu'à la réalisation est pour moi indispensable quand on leur enseigne quelque chose.

Cela n'implique pas qu'il faille supprimer les enseignements fondamentaux traditionnels : mais il faudrait alléger les programmes afin que les élèves aient le temps d'apprendre en faisant les choses eux-mêmes. Les enseignants auraient eux le temps de voir les élèves comme des individus en développement permanent, et pourraient leur permettre d'apprendre *via* l'interaction avec un environnement qu'ils auraient eux-mêmes choisi.

Si les choses se passaient ainsi, l'apprentissage viendrait de plusieurs sources :

1. Les apprentissages fondamentaux seraient assurés par l'enseignant d'une façon « traditionnelle ».
2. Les questions plus générales seraient traitées en unissant les éléments apportés par le programme et les apports personnels des élèves.

L'ensemble de l'article de Karen Evans et Christian Gerlach pousse à travailler ainsi. Les enseignants ne se contenteraient plus de préparer un groupe d'élèves à passer des examens; ils les amèneraient à assumer la responsabilité de projets, à prendre des initiatives, à développer leur personnalité, à se montrer plus créatifs et à avoir confiance en eux.

B.6.2. Faut-il fixer de nouveaux buts à l'école et de nouvelles missions aux enseignants ?

Quand on voit l'éducation et l'apprentissage comme une interaction entre les apprenants et leur environnement, il faut prendre en compte l'évolution de la société dans laquelle vivent ces « apprenants ». Je n'entrerai pas dans les détails, mais il y a deux points que j'aimerais mentionner :

1. On s'accorde à dire qu'avec l'évolution des moyens de communication (la télévision, Internet, les jeux en réseau, etc.), les adolescents ont développé des capacités nouvelles et ont une culture générale plus étendue que les élèves des générations précédentes. Mais je ne suis pas certaine que le programme et les méthodes pédagogiques aient tenu compte de cette (r)évolution. De plus, entre la télévision, Internet et les consoles de jeu, les adolescents sont globalement plus passifs qu'autrefois. Rien ni personne ne les pousse à agir. On les considère comme des consommateurs passifs, incapables du moindre effort – mais quand leur donne-t-on l'occasion d'agir, que ce soit à l'école ou chez eux?
2. La plupart des sociétés ont également changé, et je ne crois pas que les parents d'aujourd'hui puissent se comporter comme autrefois. Dans les banlieues défavorisées, beaucoup de parents ne peuvent pas suivre le travail de leurs enfants. Ils ne peuvent pas les aider dans leurs devoirs, ni leur payer des cours particuliers. Chez les plus riches, les parents sont souvent fatigués, stressés ou absents pour des raisons professionnelles, et sont peu à même d'accompagner leurs enfants. On pourrait aussi mentionner les familles monoparentales, et bien d'autres situations.

Il me semble parfois qu'au lieu de reprocher aux parents leur mode de vie et leurs méthodes éducatives, l'école devrait tenter de combler certains manques – sans pour autant se substituer aux familles, bien sûr. Nous avons sûrement la possibilité de limiter l'écart entre les enfants qui sont entourés et aidés, et ceux qui ne le sont pas. Je tiens beaucoup à l'idée que l'école est le lieu de l'égalité des chances.

L'idée que l'enseignement devrait passer par la réalisation de projets permet aussi de rendre aux enfants ce qu'ils n'ont plus chez eux. L'école, pour moi, est le lieu idéal pour que les adolescents se « construisent », « modèlent » leur cerveau et développent leur personnalité. Ce devrait être aussi l'endroit où ils ont la possibilité de traduire en actions le savoir acquis à l'école et ailleurs. La plupart du temps, cette idée ne leur vient pas. Tout cela est directement lié à ce qui est développé dans la section B.4.1.

En conséquence, il est évident que « des changements semblent nécessaires pour (adapter) l'apprentissage à l'adolescence ». Les « changements » mentionnés dans l'article de Karen Evans et Christian Gerlach sont suffisamment explicites et précis pour qu'il ne soit pas utile de développer davantage. Les auteurs disent clairement qu'il serait sans doute utile de définir de nouvelles missions pour l'école et les enseignants, qu'on devrait autoriser (ou encourager) à varier leurs méthodes, et à qui on devrait donner les moyens et le temps nécessaires à un travail plus individualisé. En insistant sur la motivation, et en allégeant les programmes, on pourrait favoriser le développement des processus cognitifs et émotionnels dans le cerveau des adolescents.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

L'article passe toutefois sous silence un point indissociable de l'enseignement : l'évaluation et la notation. Si les notes peuvent encourager et motiver, elles peuvent tout autant décourager et inhiber. Dans certains systèmes scolaires, les enfants sont notés dès l'âge de 4 ans. De telles pressions exercées sur de jeunes enfants en difficulté les empêchent certainement de trouver positif et constructif le processus d'apprentissage.

Un autre changement sera nécessaire : je crois qu'il nous faudra repenser l'évaluation et trouver un moyen pour évaluer l'évolution des compétences autant que le savoir lui-même. Le Portfolio européen des langues du Conseil de l'Europe semble intéressant : il permet à chacun d'atteindre différents niveaux de compétence sans juger ce qui, dans ce savoir, est juste ou faux. Par exemple, il montrera que vous êtes capables de poser des questions simples dans une langue étrangère, sans mentionner si vous commettez de petites erreurs de grammaire ou si votre accent est correct, etc.

Pourquoi ne pas réfléchir à une grille d'évaluation similaire pour les projets sur lesquels les élèves choisiraient de travailler ? Elle serait accompagnée d'un bulletin scolaire « traditionnel », et permettrait à certains élèves (par exemple ceux qui souffrent de dyslexie, de dyscalculie, d'ADHD, etc.) d'avoir de bien meilleurs résultats que lors des évaluations habituelles.

Tout cela paraît bien lointain… Je pense toutefois que des portes peuvent s'ouvrir sur une nouvelle façon d'enseigner. Il y a encore beaucoup à faire, et le chemin sera long avant que nous puissions « tenir compte des différences individuelles, encourager le savoir-faire et le goût du défi, et promouvoir l'autonomie et la responsabilisation quand l'adolescent y est prêt ». Je sais aussi que toutes ces considérations s'appliquent à « l'adolescent moyen », sans prendre en compte ceux avec qui nous travaillons au quotidien : psychologues, médecins ou travailleurs sociaux.

Sandrine Kelner

Références

Alexander, P.A. (2003), « The Development of Expertise: The Journey from Acclimation to Proficiency », *Educational Researcher*, vol. 32(8), pp. 10-14.

Altenmuller, E.O., W. Gruhn, D. Parlitz et autres (1997), « Music Learning Produces Changes in Brain Activation Patterns: A Longitudinal DC-EEG-study Unit », *International Journal of Arts Medicine*, vol. 5, pp. 28-34.

Baethge, M. (1989), « Individualization as Hope and Disaster », dans K. Hurrelmann et U. Engel (éd.), *The Social World of Adolescents*, de Gruyter, Berlin.

Bandura, A. (1977), « Self-efficacy: Toward a Unifying Theory of Behavioural Change », *Psychological Review*, vol. 84, pp. 191-215.

Bandura, A. (1989), « Regulation of Cognitive Processes Through Perceived Self-efficacy », *Developmental Psychology*, vol. 25, pp. 729-735.

Bandura, A. (1997), *Self-efficacy: The Exercise of Control*, Free Press, New York.

Bechara, A., H. Damasio, D. Tranel et A.R. Damasio (1997), « Deciding Advantageously before Knowing the Advantageous Strategy », *Science*, vol. 275, pp. 1293-1295.

Blakemore, S.J. et U. Frith (2000), *The Implications of Recent Developments in Neuroscience for Research on Teaching and Learning*, Institute of Cognitive Neuroscience, Londres.

Bruer, J. (1993), *School for Thought*, MIT Press.

Casey B.J., J.N. Giedd et K.M. Thomas (2000), « Structural and Functional Brain Development and its Relation to Cognitive Development », *Biological Psychology,* vol. 54, pp. 241-257.

Casey, B.J., N. Tottenham, C. Liston et S. Durston (2005), « Imaging the Developing Brain: What Have we Learned about Cognitive Development », *Trends in Cognitive Sciences,* vol. 9, pp. 104-110.

Chugani, H.T. (1998), « A Critical Period of Brain Development: Studies of Cerebral Glucose Utilization with PET », *Preventive Medicine,* vol. 27, pp. 184-188.

Chugani, H.T. et M.E. Phelps (1986), « Maturational Changes in Cerebral Function in Infants Determined by 18FDG Positron Émission Tomography », *Science*, vol. 231, pp. 840-843.

Chugani, H.T., M.E. Phelps et J.C. Mazziotta (1987), « Positron Emission Tomography Study of Human Brain Functional Development », *Annals of Neurology*, vol. 22, pp. 487-497.

Cockram, L. et H. Beloff (1978), « Rehearsing to Be Adult: Personal Development and Needs of Adolescents – », National Youth Agency.

Coffield, F. (2004), *Learning Styles and Pedagogy in Post-16 Education*, Learning and Skills Development Agency, Londres.

Cole, M. et S.R. Cole (2001), *The Development of Children* (4th edition), Worth Publishers, New York.

Coleman, J.C. (1970), « The Study of Adolescent Development Using a Sentence Completion Method », *British Journal of Educational Psychology*, vol. 40, pp. 27-34.

Coleman, J.S. (1961), *The Adolescent Society,* Free Press, New York.

Csikszentmihalyi, M. (1996), *Creativity: Flow and the Psychology of Discovery and Invention,* Harper Collins, New York.

Damasio, A.R. (1994), *Descartes' Error: Emotion, Reason, and the Human Brain*, G.P. Putnam, New York.

Davies, I.K. (1971), *The Management of Learning*, McGraw-Hill, Londres.

Devlin, J.T., R.P. Russell, M.H. Davis, C.J. Price, J. Wilson, H.E. Moss, P.M. Matthews et L.K. Tyler (2000), « Susceptibility-induced Loss of Signal: Comparing PET and fMRI on a Semantic Task », *NeuroImage*, vol. 11, pp. 589-600.

Draganski, B., C. Gaser, V. Busch, G. Schuierer, U. Bogdahn et A. May. (2004), « Changes in Grey Matter Induced by Training: Newly Honed Juggling Skills Show up as a Transient Feature on a Brain-imaging Scan », *Nature*, vol. 472, pp. 111-112.

Durston, S., H.E. Pol, B.J. Casey, J.N. Giedd, J.K. Buitelaar et H. van Engeland (2001), « Anatomical MRI of the Developing Human Brain: What Have we Learned? », *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, vol. 40, pp. 1012-1020.

Dweck, C.S. et E.L. Leggett (1988), « A Social Cognitive Approach to Motivation and Personality », *Psychological Review*, vol. 95(2), pp. 256-373.

Elliott, E.S. et C.S. Dweck (1988), « Goals: An Approach to Motivation and Achievement », *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 54, pp. 5-12.

Entwistle, N. (1984), « Contrasting Perspectives on Learning », dans F. Marton, D. Hounsell et N. Entwistle (éd.), *The Experience of Learning*, Scottish Academic Press, Edimbourg, pp. 1-18.

Erikson, E.H. (1968), *Identity, Youth and Crisis*, Norton, New York.

Evans, K. et A. Furlong (1998), « Metaphors of Youth Transitions: Niches, Pathways, Trajectories or Navigations », dans J. Bynner, L. Chisholm et A. Furlong (éd.), *Youth, Citizenship and Social Change in a European Context*, Avebury, Aldershot.

Evans, K., N. Kersh et S. Kontiainen (2004), « Recognition of Tacit Skills: Sustaining learning outcomes in adult learning and work re-entry », *International Journal of Training and Development*, vol. 8, n° 1, pp. 54-72.

Evans, K. et W. Heinz (1994), *Becoming Adults in England and Germany*, Anglo-German Foundation for the Study of Industrial Society, Londres.

Flechsig, P. (1901), « Developmental (myelogenetic) Localisation of the Cerebral Cortex in the Human Subject », Lancet, 19 octobre, pp. 1027-1029.

Fuster, J.M. (2002), « Frontal Lobe and Cognitive Development », *Journal of Neurocytology,* vol. 31, pp. 373-385.

Gardner, H. (1984), *Multiple Intelligences*, Basic Books, New York.

Giedd, J.N. (2004), « Structural Magnetic Resonance Imaging of the Adolecent Brain », *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1021, pp. 77-85.

Giedd, J. N., J. Blumenthal, N.O. Jeffries, F.X. Castellanos, H. Liu, A. Zijdenbos et autres (1999), « Brain Development during Childhood and Adolescence: A Longitudinal MRI Study », *Nature Neuroscience*, vol. 2, pp. 861-863.

Hallam, S. (2005), *Learning, Motivation and the Lifespan*, Bedford Way Publications, Institute of Education, Londres.

Havighurst, R.J. (1953), *Human Development and Education*, Longman's, New York.

Hodkinson, P. et M. Bloomer (2002), « Learning Careers: Conceptualising Lifelong Work-based Learning », dans K. Evans, P. Hodkinson et L. Unwin (éd.), *Working to Learn: Transforming Learning in the Workplace*, Routledge, Londres.

Illeris, K. (2004), *Adult Education and Adult Learning*, Roskilde University Press, Roskilde.

Johnson, M.H. et Y. Munakata (2005), « Processes of Change in Brain and Cognitive Development », *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 9, pp. 152-158.

Keating, D.P. et B.L. Bobbitt (1978), « Individual and Developmental Differences in Cognitive Processing Components of Mental Ability », *Child Development*, vol. 49, pp. 155-167.

Kohlberg, L. et C. Gilligan (1971), *The Adolescent as Philosopher*, Daedalus, vol. 100, pp. 1051-1086.

Krawczyk, D.C. (2002), « Contributions of the Prefrontal Cortex to the Neural Basis Human Decision Making », *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 26, pp. 631-664.

Mueller, C.M. et C.S. Dweck (1998), « Intelligence Praise can Undermine Motivation and Performance », *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 75, pp. 33-52.

Paus, T. (2005), « Mapping Brain Maturation and Cognitive Development during Adolescence », *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 9, pp. 60-68.

Paus, T., D.L. Collins, A.C. Evans, G. Leonard, B. Pike et A. Zijdenbos (2001), « Maturation of White Matter in the Human Brain: A Review of Magnetic Resonance Studies », *Brain Research Bulletin*, vol. 54, pp. 255-266.

Piaget, J. (1967), *Six Psychological Studies*, University of London Press, Londres.

Pinker, S. (2002), *The Blank Slate: The Modern Denial of Human Nature*, Viking, New York.

Premack, D. et A. Premack (2003), *Original Intelligence: Unlocking the Mystery of Who We Are*, McGraw-Hill, New York.

Rauschecker, J.P. et P. Marler (1987), « What Signals are Responsible for Synaptic Changes in Visual Cortical Plasticity? », dans J.P. Rauschecker et P. Marler (éd.), *Imprinting and Cortical Plasticity*, Wiley, New York, pp. 193-200.

Resnick, L.B. (1987), « Learning in School and Out », *Educational Researcher*, vol. 16, pp. 13-20.

Simos, P.G. et D.L. Molfese (1997), « Electrophysiological Responses from a Temporal Order Continuum in the Newborn Infant », *Neuropsychologia*, vol. 35, pp. 89-98.

Sowell, E.R., B.S. Peterson, P.M. Thompson, S.E. Welcome, A.L. Henkenius et A.W. Toga (2003), « Mapping Cortical Change across the Human Life Span », *Nature Neuroscience*, vol. 6, pp. 309-315.

Spear, L.P. (2000), « The Adolescent Brain and Age-related Behavioral Manifestations », *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 24, pp. 417-463.

Stevens, B. et R.D. Fields (2000), « Response of Schwann Cells to Action Potentials in Development », *Science*, vol. 287, pp. 2267-2271.

Sylvester, R. (1995), *A Celebration of Neurons: An Educators' Guide to the Human Brain*, Association for Supervision and Curriculum Development (ASCD), Alexandria.

Twenty-first Century Learning Initiative (2005 draft), « Adolescence: A Critical Evolutionary Adaptation », 21st Century learning Initiative, Bath.

Tyler, L.K., W. Marslen-Wilson et E.A. Stamatakis (2005), « Dissociating Neuro-cognitive Component Processes: Voxel-based Correlational Methodology », *Neuropsychologia*, vol. 43, pp. 771-778.

Wall, W.D. (1968), *Adolescents in School and Society*, National Foundation for Education Research, Slough.

White, T., N.C. Andreasen et P. Nopoulos (2002), « Brain Volumes and Surface Morphology in Monozygotic Twins », *Cerebral Cortex*, vol. 12, pp. 486-493.

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

PARTIE III

Article C

Cerveau, cognition et apprentissage à l'âge adulte

par
Raja Parasuraman, George Mason University, Fairfax, VA, États-Unis
Rudolf Tippelt, Ludwig-Maximilian-University, Münich, Allemagne
Réactions : Liet Hellwig, professeur de A.L.E., formatrice d'enseignants, Vancouver, Canada

C.1. Introduction

Le nombre de personnes âgées, surtout de femmes, subit actuellement une augmentation sans précédent dans presque tous les pays développés et dans certains pays en voie de développement (Keyfitz, 1990; OCDE, 2005). Avec l'évolution actuelle de nos sociétés, les adultes d'âge mûr se voient obligés de maîtriser les nouvelles technologies, que ce soit au travail ou dans leur vie privée. Cela peut poser de grandes difficultés à des gens dont les capacités sensorielles, perceptuelles et cognitives sont sur le déclin. Il est donc très important de comprendre les conséquences du vieillissement sur l'apprentissage, à la fois d'un point de vue psychologique et éducatif et en relation avec les mécanismes cérébraux qui permettent d'apprendre.

Les rapports entre apprentissages et vieillissement sont liés à des questions biogénétiques, médicales, psychologiques, sociales et pédagogiques. Comprendre le cerveau, la cognition et l'apprentissage à l'âge adulte nécessite donc une approche interdisciplinaire (Bransford, Brown et Cocking, 2004). D'un côté, la recherche sur le cerveau tente de comprendre les opérations et les fonctions qui sous-tendent les comportements cognitifs, affectifs et sociaux. La neuroscience permet donc de mieux connaître le développement et le fonctionnement du cerveau lors de l'apprentissage. D'un autre côté, la recherche sur l'éducation et le vieillissement n'oublie pas que la réussite culturelle, économique et politique des sociétés contemporaines dépend de la capacité à résoudre les problèmes dont font preuve leurs citoyens tout au long de leur vie. Ces capacités sont acquises dans les différentes structures du système éducatif ainsi que *via* des processus d'apprentissage autonomes, qu'ils soient formels ou informels.

C.1.1. Qu'est-ce que l'apprentissage?

Le terme « apprentissage » est difficile à définir, car différentes disciplines l'entendent de différentes façons. En psychologie, on peut dire qu'il s'agit d'une amélioration de l'efficacité ou de l'utilisation d'un processus cognitif élémentaire (conscient ou inconscient) qui permet de mieux résoudre les problèmes rencontrés et de mieux réaliser les tâches de la vie quotidienne. Apprendre et réfléchir sont donc liés de façon que la cognition est une condition nécessaire, mais pas suffisante, à l'apprentissage. Pour les spécialistes de l'éducation, « apprendre » ne peut pas être isolé de l'idée d'agir sur le monde. Apprendre implique non seulement une augmentation des connaissances, mais aussi une modification de la façon d'agir.

Il faut également faire la distinction entre processus d'apprentissage formel, non formel et informel, surtout chez les adultes. L'apprentissage formel a lieu dans les structures éducatives, tandis que les clubs, les associations, le travail sont des lieux d'apprentissage non formel. L'apprentissage informel enfin, souvent involontaire, se produit hors des cadres d'apprentissage prédéfinis (Tippelt, 2004). Et puis, bien que l'apprentissage s'étale sur la vie entière, la recherche empirique sur l'enfance, la jeunesse et les seniors reste encore assez compartimentée, entre autres parce que les différentes

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

étapes de la vie et de l'apprentissage sont complexes; il s'agit presque de champs d'étude indépendants, qui sont rarement réunis dans une perspective globale (Weinert et Mandl, 1997).

C.1.2. Le cerveau humain à l'âge adulte

Psychologie et éducation considèrent toutes deux que l'apprentissage reflète, au moins en partie, le développement et la réalisation de processus cognitifs; on veut donc chercher à comprendre les mécanismes neuraux impliqués. En neurobiologie, on peut voir l'apprentissage comme l'évolution de l'importance et de l'efficacité des connexions synaptiques qui permettent les processus cognitifs (*cf.* Spitzer, 2002). On sait aujourd'hui que, bien que les principales structures du cerveau humain soient déjà en place à la naissance, d'importantes évolutions du nombre de neurones, de leur connectivité et de l'efficacité fonctionnelle ont lieu durant toute l'enfance. Mieux encore, la maturation et le développement structurel du cerveau continuent jusqu'au début de l'âge adulte, c'est-à-dire vers 25 ans.

À l'âge adulte (de 20 à 80 ans), on observe encore des changements structurels et fonctionnels dans le cerveau, même s'ils sont moins nets et plus subtils – sauf dans le cas de maladies touchant les personnes âgées, comme la démence, où les changements sont radicaux. Comme le cerveau d'un enfant de six ans a déjà atteint 90 % de sa taille adulte, on a longtemps cru que l'évolution s'arrêtait vers ce moment-là. On sait à présent que c'est faux. Les techniques de neuroimagerie modernes permettent même de quantifier ces évolutions, qui ne sont d'ailleurs pas dues seulement à des mécanismes génétiques, puisque l'environnement et le style de vie jouent également un rôle.

Un autre mythe voulait qu'aucun nouveau neurone n'apparaisse plus à l'âge adulte. On a démontré, au contraire, que des neurones étaient créés dans l'hippocampe (Eriksson et autres, 1998), et peut-être dans d'autres zones cérébrales. Cette découverte a d'autant plus d'importance qu'on s'est également aperçu que la neurogénèse dans l'hippocampe est impliquée dans la formation de nouveaux souvenirs (Shors et autres, 2001). L'apprentissage à l'âge adulte est donc au moins en partie lié à des modifications cérébrales structurelles, y compris la formation de nouveaux neurones. Il faut alors mettre au jour les mécanismes précis qui associent ces modifications à l'évolution dans le temps de la cognition et de l'apprentissage.

C.1.3. Vue d'ensemble de l'article

Nous nous intéressons à l'évolution neurale durant l'âge adulte (entre 20 et 80 ans). La recherche cérébrale comme les sciences de l'éducation se basent sur l'expérience et tentent d'apporter aux praticiens et aux décideurs politiques des éléments avérés sur lesquels ils puissent se baser. Idéologies et opinions ne peuvent suffire à justifier des décisions importantes – mais sommes-nous capables de fournir des faits certains? Les neuroscientifiques et les chercheurs en sciences de l'éducation peuvent-ils éviter de tomber dans la « neurologisation » naïve, qui construit des théories de l'éducation à partir d'idées scientifiques mal vulgarisées, ou simplement inexactes? (Bruer, 1997). Nous le croyons. Cet article adopte donc les deux perspectives (neuroscience et sciences de l'éducation), puisque seule une collaboration interdisciplinaire peut permettre de mieux comprendre l'apprentissage (OCDE, 2002).

Nous examinons en quoi l'évolution du cerveau est liée aux modifications comportementales et cognitives observées à l'âge adulte. Le but, au final, est d'étudier les implications de ces changements liés à l'âge sur l'apprentissage, l'enseignement et l'éducation, et de déterminer comment ces trois éléments doivent aborder le vieillissement.

C.2. L'âge adulte : cognition et apprentissage au fil du temps

C.2.1. Vieillissement et cognition

On dispose de nombreuses études sur l'évolution avec l'âge de la cognition et de l'apprentissage (Baltes, 1993; Salthouse, 1996). La plupart procèdent par échantillonnages en comparant des groupes d'adultes vieillissants et des groupes de jeunes adultes, mais on dispose de quelques études diachroniques, qui testent sur différentes tâches cognitives un groupe d'individus sur une longue période de leur vie. À la fois les études par échantillonnage et les études diachroniques concluent que certaines fonctions perceptuelles et cognitives deviennent moins performantes avec l'âge, alors que d'autres restent stables et que d'autres encore s'améliorent (Baltes, 1993; Park et Schwartz, 1999). Globalement, l'évolution observée est la suivante : en prenant de l'âge, on se fait plus lent et la mémoire devient moins bonne, mais nos connaissances générales et notre maîtrise du langage s'améliorent, ainsi que la capacité à résoudre des problèmes de façon originale, et ce qu'on peut appeler la « sagesse » (Baltes et Staudinger, 2000; Sternberg, 1990). Les adultes âgés sont plus lents que les jeunes (Salthouse, 1996; Schaie, 2005), et leur mémoire de travail est plus réduite (Dobbs et Rule, 1989). Il est également démontré que, avec l'âge, les capacités sensorielles périphériques (par exemple l'acuité rétinienne) et centrales (par exemple la perception du mouvement) diminuent de façon régulière (Lindenberger, Scherer et Baltes, 2001).

Il est également pertinent d'évoquer la distinction entre intelligence fluide et intelligence cristallisée (Cattell, 1963). L'intelligence fluide décline à partir d'environ quarante ans. L'intelligence cristallisée, en revanche, reste stable – voire augmente. De plus, les adultes âgés disposent d'une meilleure connaissance du monde et de compétences verbales supérieures, ce qui peut leur permettre de compenser la dégradation de leurs capacités de traitement du langage et de leur mémoire de travail (Kruse et Rudinger, 1997).

Une étude exhaustive de multiples champs de perception et de cognition montre bien quelles évolutions sont classiquement observées au cours du vieillissement. Park et autres (2002) ont demandé à un échantillon d'environ 300 adultes de 20 à 90 ans d'effectuer plusieurs tâches, dont certaines faisaient appel à la mémoire de travail, à la mémoire à long terme, au vocabulaire et à la vitesse de traitement de l'information. Cet assez large panel a permis d'établir des performances « normales » (z) pour chaque tranche d'âge. Park et autres (2002) ont observé un déclin régulier en ce qui concerne traitement de l'information, mémoire de travail et mémoire à long terme (avec ou sans indice), alors que le vocabulaire (tests Shipley et WAIS) est stable, et s'améliore même entre 60 et 90 ans.

Baltes et Lindenberger (1997) du Berlin Aging Study rapportent un déclin linéaire comparable de la vitesse de traitement de l'information, de la mémoire de travail et de la mémoire à long terme de 25 à 103 ans. Il est intéressant de noter que le déclin des capacités ne varie pas significativement en fonction de l'éducation, de la classe sociale ou du niveau de revenus. Mais le déclin des perceptions sensorielles (acuités visuelle et auditive) est déterminant dans le déclin perceptuel et cognitif. Les auteurs en ont conclu que l'état des fonctions sensorielles (indicateur de l'intégrité cérébrale indépendant des facteurs environnementaux ou sociaux) était un élément biologique fondamental du déclin cognitif lié au vieillissement.

Le vieillissement influence sans doute aussi l'utilisation de stratégies ou de priorités dans la réalisation de tâches cognitives, surtout quand des personnes âgées sont placées dans des environnements non familiers, ou dans lesquels elles doivent faire preuve de connaissances nouvelles. Les personnes âgées semblent ne pas assigner les mêmes priorités

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

au traitement des tâches que les gens plus jeunes, peut-être parce qu'il leur faut répartir différemment des ressources diminuées, comme la mémoire de travail. C'est visible même pour des compétences bien acquises ou « automatiques » comme la marche. Par exemple, Li et autres (2001) ont montré que l'âge joue un rôle dans une expérience où les gens étaient entraînés à une tâche de mémorisation puis à une tâche de marche, avant d'être testés sur les deux tâches en même temps. Lors du test simultané, les personnes âgées arrivaient très bien à marcher, mais leurs performances de mémorisation étaient inférieures aux résultats obtenus quand les deux tâches étaient testées séparément. On peut supposer qu'elles cherchaient d'abord à réussir le test de marche, au détriment de la mémorisation, alors que les jeunes adultes n'avaient pas besoin de choisir et pouvaient réussir les deux tâches. Les personnes âgées accordent plus d'importance que les jeunes à l'information descendante, quand elle est disponible, pour réaliser des tâches complexes faisant appel à l'attention. Par exemple, repérer des éléments précis parmi des « leurres » dans un environnement très chargé visuellement dépend de facteurs « ascendants » – l'élément à trouver est-il bien visible, et ressemble-t-il beaucoup aux leurres ? – et de facteurs « descendants » – on le repère d'autant plus facilement qu'on sait plus précisément vers où il se trouve et à quoi il ressemble. Greenwood et Parasuraman (1994, 1999) ont demandé à des adultes de différents âges de rechercher un élément (déterminé à la fois par la forme et par la couleur) parmi beaucoup d'autres. Avant de montrer l'image, ils indiquaient aux participants, avec différents niveaux de précision, la zone approximative où se trouvait l'élément en question. Ces indications faisaient diminuer le temps mis à accomplir la tâche par les personnes âgées, davantage que par les plus jeunes. La mise en place de priorités différentes dans le traitement de l'information est peut-être une stratégie de protection : les personnes âgées voient leur capacités de traitement décliner et leurs connaissances augmenter (Park et autres, 2002). Ainsi, Hedden, Lautenschlager et Park (2005) montrent que les personnes âgées utilisaient davantage leurs connaissances lexicales que les jeunes dans une tâche de mémorisation et d'association, alors que les plus jeunes mettaient à profit leur vitesse de traitement et leur mémoire de travail.

On peut donc dire qu'on dispose de preuves solides du déclin avec l'âge des fonctions sensorielles, de la vitesse de traitement, de la mémoire de travail et de la mémoire à long terme, alors que le vocabulaire, les connaissances sémantiques et la sagesse ont tendance à augmenter. Ces fonctions cognitives sont très importantes (individuellement et collectivement) pour l'apprentissage. Le vieillissement semble également accompagné d'une modification des priorités assignées aux tâches, et des stratégies utilisées. Les personnes âgées sont plus dépendantes des facteurs descendants, dont l'absence leur est pénalisante. Toutes ces modifications des fonctions cognitives peuvent avoir un impact négatif sur l'apprentissage chez les personnes âgées. Mais celles-ci peuvent compenser le déclin de leurs fonctions cognitives élémentaires grâce à leur maîtrise sémantique et à leur connaissance du monde, qui se sont améliorées avec les années. Mettre à profit ces avantages, pour contourner les inconvénients, est une piste possible pour l'enseignement destiné aux personnes âgées.

C.2.2. L'apprentissage tout au long de la vie : la perspective de l'éducation des adultes

La perspective du développement tout au long de la vie complète l'approche cognitive du vieillissement décrite dans la section précédente; elle doit beaucoup à la contribution d'Erik Erikson (1966) qui montre que le développement ontogénétique couvre toute la vie d'un individu. Le développement n'est pas confiné à une tranche d'âge donnée;

l'apprentissage est continuel, et cumulatif. Des processus d'apprentissage inattendus et discontinus peuvent avoir lieu à tout âge. Erikson s'intéressait surtout à la façon dont un individu gère les crises qu'il traverse au cours de sa vie, alors qu'aujourd'hui la recherche sur l'éducation, l'apprentissage et le développement met en avant la nature multi-directionnelle des changements ontogénétiques. Par exemple, des études récentes ont montré les rapports entre autonomie et dépendance; la dynamique qui unit croissance, conservation des acquis et gestion des pertes s'observe chez les personnes âgées au cours de leur vie (Baltes, 1993; Lehr, 1991). Apprendre et se développer n'impliquent pas forcément augmenter ses capacités ou son efficacité. Si au début de la vie, le premier but de l'apprentissage est de développer l'autonomie et l'empathie, avec l'âge il devient très important d'apprendre à gérer la perte de l'indépendance physique et d'utiliser les réseaux sociaux de soutien d'une manière créative et productive.

Prévenir la dépendance est un but fondamental de l'apprentissage chez les personnes âgées, car maintenir l'état de ses compétences permet à la capacité d'agir et à la croissance personnelle de s'exercer de concert (Alterskommission, 2005). L'évolution du développement dépend beaucoup du contexte social et du type de vie de chacun. Les sociologues, eux, insistent sur l'importance du contexte historique d'apprentissage : l'apprentissage tout au long de la vie ne dépend pas seulement des conditions biologiques et cognitives préexistantes, mais aussi des environnements sociaux et culturels liés à des époques historiques. Le développement lié à l'âge est alors associé à des expériences collectives de crises économiques, de périodes plus fastes, à des valeurs culturelles et à des éléments politiques. Par exemple, les adultes d'aujourd'hui ont un niveau d'instruction supérieur à celui des générations précédentes, et sont plus familiers avec les possibilités d'apprentissage. L'augmentation de l'espérance de vie et le progrès technique font courir aux systèmes de connaissances le risque d'être rapidement dépassés. Il ne suffit plus d'éduquer les jeunes générations. Et puis, pour les individus comme pour la société, le travail ne peut plus être dissocié de processus d'apprentissage. D'un côté, ces apprentissages ont pour principaux buts l'augmentation de la compétitivité économique, le maintien de la valeur de l'individu pour l'employeur, et le renforcement de la cohésion sociale dans nos sociétés plurielles et individualisées. Mais d'un autre côté, l'apprentissage tout au long de la vie vise aussi à enrichir sa personnalité et à conserver son indépendance à l'âge adulte. Il ne faut pas l'oublier dans l'analyse des relations entre cerveau et apprentissage à l'âge adulte.

Dans la recherche sur l'apprentissage et l'éducation, comme en gérontologie, on distingue trois types de vieillissement : normal, optimal et pathologique (Thomae, 1970; Kruse, 1997; Lehr, 1991). Le processus de vieillissement varie considérablement selon les individus. Les stratégies d'apprentissages et les méthodes de recherche doivent donc tenir compte des facteurs individuels. Dans les sections suivantes, nous nous intéresserons aux différences individuelles d'un point de vue cognitif, génétique et neural.

Le processus normal de vieillissement et les meilleurs types d'apprentissage à l'âge adulte sont liés à l'amélioration des conditions pédagogiques, médicales, psychologiques et sociales, ainsi qu'aux services disponibles. L'importance accordée par la famille et l'école à l'apprentissage au début de la vie d'un individu influence son développement et le prédispose à adopter une attitude positive face à l'apprentissage à l'âge adulte (Feinstein et autres, 2003). Une telle analyse décrit le processus de vieillissement à l'aide d'un modèle de compétences optimiste, et remplace le modèle plus restrictif qui ne voit que le déficit cognitif, psychologique et social lié au vieillissement (Kruse et Rudinger, 1997).

Indépendamment du modèle centré sur le déficit, il existe des études qui analysent les conséquences pathologiques du vieillissement : les différentes formes de démence et les maladies (concomitantes) qui touchent souvent les personnes âgées. La prévention (dès l'adolescence ou le début de l'âge adulte) maximise les chances de vivre longtemps, en bonne santé, en conservant son indépendance. Baltes (2003) rappelle que limiter les maladies (y compris mentales) aux toutes dernières années de la vie (dans le cadre d'une espérance de vie de plus en plus longue) permettrait aux personnes âgées de vivre plus longtemps tout en restant actives. Tout cela soulève des questions importantes dans le cadre de la neuroscience : qu'en est-il des recherches en imagerie cérébrale chez les personnes âgées ? Les différences individuelles affectent-elles les fonctions cérébrales ? Le déclin des processus de traitement de l'information dans le cortex peut-il être compensé d'une façon ou d'une autre ? Comment les différents processus cognitifs et émotionnels se manifestent-ils dans le cerveau ? Et enfin, que peut-on tirer des publications en neuroscience cognitive pour optimiser le processus de vieillissement et les possibilités d'apprentissage à l'âge adulte ? Certaines de ces questions sont étudiées plus loin.

C.3. Vieillissement et fonctions cérébrales : la neuroimagerie structurelle

Le vieillissement du cerveau est associé à une série de changements structurels à tous les niveaux : intra-cellulaire, neuronal et cortical. Des autopsies ont montré que le cerveau perd environ 2 % de son poids et de son volume à chaque décennie (Kemper, 1994). La tomographie assistée par ordinateur (TAO) et l'imagerie à résonance magnétique (IRM) ont confirmé que le volume du cerveau diminue avec l'âge (Raz et autres, 2005). L'IRM est plus sensible que la tomographie, et permet de distinguer la substance grise (les neurones) de la substance blanche (les axones). L'IRM à haute résolution arrive en plus à quantifier les modifications de volume de structures corticales et subcorticales spécifiques, ainsi que des ventricules.

Les données obtenues par IRM montrent que le vieillissement s'accompagne d'une diminution du volume de substance grise (Resnick et autres, 2003; Sowell et autres, 2003), qui commence dès trente ans (Courchesne et autres, 2000) mais n'est clairement détectable qu'à partir de cinquante ans. Une récente étude présente des résultats sur une large tranche d'âge : de 15 à 90 ans (Walvhold et autres, 2005). On voit que la substance grise corticale diminue tout au long de la vie, mais que cette diminution est plus sensible à partir de l'âge mûr. Il n'est cependant pas prouvé qu'elle s'accompagne d'une diminution du nombre de neurones. (La sagesse populaire, qui veut que nous perdions des neurones en prenant de l'âge, n'a donc pas forcément raison.) On dispose d'éléments qui soutiennent cette thèse (Kemper, 1994), mais d'aucune preuve indéniable. D'autres émettent l'hypothèse que la diminution du volume de substance grise correspond à une diminution de la taille des neurones plutôt que de leur nombre.

Le vieillissement est également associé à des altérations de la substance blanche, même si on ne connaît pas encore très bien leur étendue. Certaines études n'ont pas conclu à une modification selon l'âge du volume global de substance blanche (Good et autres, 2001), alors que d'autres disent qu'il diminue avec le temps (Guttman et autres, 1998; Jernigan et autres, 2001). Walvhold et autres (2005) ont eux observé une diminution, certes irrégulière. Des anomalies de la substance blanche – des « hyperintensités » dues à des dégradations locales des axones ou des vaisseaux – ont été observées chez des personnes âgées (Guttmann et autres, 1998).

C.4. Vieillissement et fonctions cérébrales : la neuroimagerie fonctionnelle

Plusieurs études par TEP (tomographie par émission de positons) et par IRMf (imagerie à résonance magnétique fonctionnelle) sur des adultes de différents âges ont révélé des différences liées à l'âge dans l'activation de zones cérébrales durant la réalisation de tâches perceptuelles et cognitives. L'étude par TEP de Grady et autres (1994) a montré que, lors d'une tâche consistant à identifier des visages, le cortex occipital était moins activé chez les personnes âgées que chez les plus jeunes. Globalement, les personnes âgées montrent une moindre activation des régions corticales dédiées au traitement élémentaire des perceptions, c'est-à-dire des cortex occipital et temporal, durant les tâches de détection et de reconnaissance visuelle.

Le vieillissement est donc bien associé à une diminution de l'activation d'aires corticales dédiées au traitement de la perception; mais on a fait la preuve d'une activation d'autres aires cérébrales, non observée chez les sujets plus jeunes – en particulier, on dispose d'études montrant une plus grande activation du cortex préfrontal (CPF), y compris une activation bilatérale, lors de tâche de détermination lexicale (Madden et autres, 1996), de recherche visuelle (Madden et autres, 2004) et de résolution de problèmes (Rypma et D'Esposito, 2000).

On a expliqué ces différences d'activation de plusieurs façons. Une théorie explique que la plus grande activation (surtout dans le CPF) chez les personnes âgées sert à compenser le déclin des capacités de traitement du système neuronal (Park et autres, 2002; Rosen et autres, 2002). Ainsi, Gutchess et autres (2005) ont montré que, pour mémoriser des images, les personnes âgées activent davantage le CPF médian, alors que chez les plus jeunes c'est l'hippocampe qui est surtout activé. Cela laisse penser que les personnes âgées compensent la baisse d'efficacité de l'hippocampe en faisant appel aux ressources des aires frontales, de la même façon que, comme le dit la théorie cognitive présentée plus haut, elles adaptent leurs stratégies (en mettant à profit leurs connaissances lexicales supérieures) pour compenser le déclin de leurs capacités de traitement de l'information.

Une autre possibilité évoque la moins bonne latéralisation cérébrale des personnes âgées. En effet, elles montrent une activation bilatérale là où des adultes plus jeunes utilisent seulement leur hémisphère gauche (par exemple pour coder des informations) ou droit (pour des tâches nécessitant leur attention visuelle) (Cabeza, 2002). Les résultats obtenus par la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) corroborent cette hypothèse. Appliquée au CPF dorso-latéral droit chez de jeunes adultes, elle interfère avec la remémoration, alors que chez les personnes âgées, elle produit le même effet quel que soit l'hémisphère (Rossi et autres, 2004).

Les résultats de ces expériences de neuroimagerie suggèrent donc que les personnes âgées compensent le déclin de leurs capacités de traitement en faisant appel à des zones cérébrales différentes ou supplémentaires, principalement le cortex préfrontal. Si cette flexibilité est avérée, cela implique que la plasticité du cerveau est conservée jusque dans la vieillesse. Néanmoins, tous les résultats obtenus en neuroimagerie ne peuvent pas être expliqués par un système de « compensation ». Ainsi, les personnes âgées ont une activation de l'hippocampe moindre que les jeunes adultes, mais la zone para-hippocampale, elle, est plus intensément stimulée lorsqu'elles se remémorent un événement (Grady, McIntosh et Craik, 2003).

En bref, la neuroimagerie fonctionnelle a clairement montré des différences liées à l'âge dans l'activation des zones du cerveau durant la réalisation de tâches perceptuelles et

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

cognitives. Ces différences sont très nettes dans le cortex préfrontal, dont on connaît l'importance pour les fonctions cérébrales « exécutives » supérieures, et qui peut être particulièrement touché par le vieillissement. Néanmoins, il n'y a pas aujourd'hui de consensus quant à la signification théorique des modifications de l'activité cérébrale avec l'âge. Récemment, une étude de Colcombe et autres (2005) a proposé une synthèse en disant que les personnes âgées qui montraient des schémas d'activation « anormaux » étaient moins performantes, alors que celles qui conservaient leur efficacité avaient une activation « normale ». Puisque les performances des personnes âgées peuvent être améliorées par l'entraînement (entre autres), on peut penser que le degré de « normalité » de l'activité cérébrale est un marqueur possible du succès de l'apprentissage chez les personnes âgées.

C.5. Différences individuelles dans les modifications cérébrales et cognitives au cours du temps

Dans les sections précédentes, nous avons montré que globalement les personnes âgées subissent des modifications dans différents aspects du fonctionnement cognitif. Le vieillissement est également accompagné d'évolutions (générales et locales) du volume de substance grise et du volume de substance blanche. Il est possible que ces deux éléments soient liés, et que les modifications structurelles entraînent des changements cognitifs – mais alors, qu'en est-il des différences individuelles ? Le déclin cognitif varie considérablement selon les individus. Certains perdent beaucoup de leurs facultés cognitives, d'autres ne subissent que des pertes minimes, et quelques-uns se maintiennent toute leur vie à un niveau presque stable. De plus, les capacités cognitives supérieures restent au même niveau, ou presque, chez un pourcentage non négligeable de personnes âgées (Wilson et autres, 2002).

Puisque les personnes âgées sont moins efficaces que les jeunes dans les tâches faisant appel à la vitesse de traitement, la mémoire de travail et les fonctions exécutives, et puisque le vieillissement s'accompagne de modifications du fonctionnement cérébral et d'altération dans l'activation des aires cérébrales lors de la réalisation de tâches cognitives, on peut se demander si les changements cognitifs et les modifications du cerveau sont liés. On dispose d'éléments qui tendent à le montrer (Cabeza, Nyberg et Park, 2005). Le volume de substance grise et de substance blanche diminue avec l'âge (Bartzokis et autres, 2003 ; Resnick et autres, 2003), mais on constate d'importantes variations individuelles – comme pour le déclin cognitif (Raz et autres, 2005).

À quoi ces différences sont-elles dues ? Il est tentant de les attribuer à la diminution du volume du cerveau, d'autant que plusieurs études ont montré un lien entre perte de volume du cortex préfrontal et déclin des fonctions cognitives régulant les processus « exécutifs » et inhibitoires (voir Raz et autres, 2005). Grâce aux nouvelles techniques de neuroimagerie, comme l'imagerie du tenseur de diffusion (DTI) qui permet d'observer l'intégrité des neurones dans un cerveau humain vivant, on a pu établir des liens entre changements cognitifs et variations du volume de substance blanche (Bartzokis et autres, 2003) : de tels liens sont importants puisqu'on sait que les fonctions exécutives supérieures sont très sensibles au vieillissement, et fondamentales pour les nouveaux apprentissages et l'expression de l'intelligence fluide (Cabeza, Nyberg et Park, 2005). Ils sont importants, mais pas encore vraiment prouvés. Récemment, une méta-analyse du volume de l'hippocampe et du fonctionnement de la mémoire chez des adultes d'âge mûr et des personnes âgées a montré que ces rapports sont assez indirects (Van Petten, 2004).

Le manque de régularité du lien entre volume cérébral et cognition chez les personnes âgées donne à penser que d'autres variables doivent être prises en compte, comme les facteurs environnementaux, qui englobent les occasions d'apprendre, l'interaction sociale, l'entraînement, l'exercice, la stimulation intellectuelle, etc. Les effets de certains de ces facteurs sur le cerveau et le vieillissement cognitif ont déjà été identifiés (voir Raz et autres, 2005).

Le rôle des gènes est aussi très important. On sait que les facteurs génétiques influencent considérablement les capacités cognitives générales (« *g* ») (Plomin, DeFries, McClearn et McGuffin, 2001). L'héritabilité de *g* augmente au cours de la vie et atteint 0.62 à partir de 80 ans (McClearn et autres, 1997). Un haut niveau de *g* (Schmand et autres, 1997; Whalley et autres, 2000) et un fonctionnement cognitif efficace (Snowdon et autres, 1996) au début de la vie diminuent les risques de développer ultérieurement la maladie d'Alzheimer. La grande héritabilité de *g* indique assez clairement que la génétique joue un rôle important dans la façon dont la cognition de chacun évolue avec l'âge.

C.6. La génétique et les différences individuelles en matière de cognition

La plus grande part de ce qu'on sait sur l'aspect génétique de la cognition vient d'études réalisées sur des jumeaux homozygotes et hétérozygotes, que l'on compare afin de déterminer si une caractéristique est héréditaire ou non. Cette méthode est très utilisée en génétique du comportement depuis plus d'un siècle. Elle a permis de montrer que l'intelligence générale, « *g* », est très héritable (Plomin et Crabbe, 2000), mais n'est pas capable d'identifier les gènes *précis* auxquels sont dus l'intelligence ou les composants cognitifs de *g*. Les dernières avancées en génétique moléculaire débouchent sur une approche qui enrichit celle de la génétique du comportement : l'*association allélique*, qu'on a récemment appliquée à l'étude des différences cognitives individuelles chez des sujets en bonne santé et qui a montré que des gènes précis influencent la performance réalisée lors de tâches cognitives (Fan et autres, 2003; Greenwood et autres , 2000; Parasuraman, Greenwood et Sunderland, 2002; pour un compte rendu, voir Greenwood et Parasuraman, 2003).

La méthode d'association allélique consiste à identifier les variations *normales* des gènes candidats (ceux qu'on pense susceptibles d'avoir une influence sur telle ou telle capacité cognitive en raison du rôle fonctionnel de leur protéine), et à examiner leur lien possible avec des fonctions cognitives. Plus de 99 % de l'ADN du génome humain est identique chez tous les individus, et n'a que peu d'intérêt pour l'étude des différences cognitives individuelles. Mais une petite fraction des paires de base (pb) apparaît sous différentes formes, ou allèles. La variation allélique est due à de légères différences dans la chaîne d'acides nucléiques qui constitue le gène – généralement conséquences de la substitution d'un nucléotide par un autre, appelée polymorphisme nucléotidique (SNP). La protéine dont la production est régie par ce gène change également (voir Parasuraman et Greenwood, 2004).

Si, dans un réseau de neurones, on sait à quel neurotransmetteur est due une fonction cognitive donnée, on peut en principe établir le lien entre les SNP qui influencent la neurotransmission et la fonction cognitive en question. Par exemple, dans le domaine de l'attention et de la mémoire de travail, des études sur les lésions, en électrophysiologie, en neuroimagerie et en pharmacologie, mettent en évidence le rôle des zones cérébrales postérieures (neurotransmetteur concerné : la choline) dans l'attention spatiale, et des réseaux du cortex préfrontal (neurotransmetteur concerné : la dopamine) pour la mémoire de travail et les processus de contrôle exécutif (Everitt et Robbins, 1997). Parmi les gènes, ce

sont donc probablement les récepteurs dopaminergiques qui influencent la mémoire de travail et les processus de contrôle exécutif.

Le gène DBH (dopamine bêta hydroxylase), lui, joue peut-être un rôle dans les différences individuelles concernant la mémoire de travail; il transforme la dopamine en norépinephrine dans les vésicules des neurones. Un polymorphisme dans le gène DBH (le remplacement de G par A en position 444 dans l'exon 2 [G444A] du chromosome 9q34) a été associé avec des cas familiaux de trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité. Trois génotypes sont associés à ce SNP : AA, AG et GG. Parasuraman et autres (2005) ont étudié le rôle de la DBH dans l'attention et la mémoire de travail chez un groupe d'adultes en bonne santé de 18 à 68 ans. Le test destiné à évaluer la mémoire de travail consistait à observer des points noirs (jusqu'à 3) pendant trois secondes. Ensuite, un point rouge apparaissait, et les participants avaient deux secondes pour déterminer s'il était au même endroit que l'un des points noirs. Plus le nombre de points noirs, et donc d'emplacement à retenir, augmentait, moins les résultats étaient bons : la réussite à cette tâche est donc liée à la mémoire de travail. Pour un seul point noir, les trois génotypes réussissaient la tâche de la même façon, mais plus l'allèle G était présente dans les gènes, mieux la tâche était réussie lorsque le nombre de points augmentait. Pour trois points, les résultats obtenus par les gens porteurs de l'allèle GG (dose de guanine=2) sont nettement meilleurs que pour les porteurs de l'allèle AG (dose de guanine=1) et de l'allèle AA (dose de guanine=0) dans un rapport de 125 % – un effet « modéré » dans la terminologie de Cohen (1988). Parasuraman et autres (2005) ont d'autre part soumis les mêmes personnes à une tâche d'attention visuelle et spatiale qui ne faisait presque pas appel à la mémoire de travail. Les résultats des participants, cette fois, ne dépendaient pas de manière significative de la variation allélique du gène DBH. Qui plus est, l'efficacité de la mémoire de travail lorsque trois points noirs étaient présentés n'était pas liée à la performance réalisée dans la tâche d'attention. On voit l'importance du gène DBH pour la mémoire de travail.

Parasuraman et autres (2005) ont découvert que plus l'allèle G est présente dans le gène DBH, meilleures sont les performances de la mémoire de travail. C'est d'autant plus sensible que le nombre d'emplacement à retenir est élevé. Le lien entre gène DBH et mémoire de travail est donc d'autant plus visible que l'effort demandé à la mémoire de travail est important. Ces résultats, et d'autres (voir Parasuraman et Greenwood, 2004), indiquent que l'analyse génétique au niveau moléculaire peut permettre d'éclairer le rôle de la génétique dans les différences cognitives individuelles. Ces résultats ont été étendus aux adultes d'âge mur et aux personnes âgées, chez qui l'interaction des gènes encodant pour les neurotransmetteurs (type DBH) et des gènes liés aux réparations des neurones (type ApoE, apolipoprotéine E) a été démontrée (Greenwood et autres, 2005; Espeseth et autres, 2007). Ces découvertes sont intéressantes parce qu'on a établi le rapport entre efficacité de la mémoire de travail et efficacité de l'apprentissage, de la prise de décision, de la résolution de problèmes et d'autres tâches cognitives complexes. Les différences individuelles dans la capacité de mémoire de travail sont bien documentées (Conway et Engle, 1996) et fiables (Klein et Fiss, 1999). Une bonne mémoire de travail est associée à une meilleure capacité à éliminer les interférences dans le test de Stroop (Kane et Engle, 2003). Les individus doués d'une bonne mémoire de travail sont donc peut-être mieux à même de s'adapter à de nouvelles situations d'apprentissage, et, en vieillissant, ont moins besoin de contrôle descendant pour compenser le déclin de la vitesse de traitement. De plus, comme nous l'expliquerons plus loin, des méthodes d'entraînement cognitif pourraient améliorer la capacité de la mémoire de travail chez certaines personnes âgées.

C.7. Entraînement et vieillissement

C.7.1. Entraînement cognitif

On a de bonnes raisons de penser que la « stimulation cognitive » chez la personne âgée (de sa propre initiative, ou de celle de sa famille) peut permettre d'éviter ou de limiter le déclin des fonctions cognitives (Karp et autres, 2004). Wilson et autres (2002) ont demandé à des personnes âgées d'évaluer leur niveau d'investissement dans diverses activités exigeantes sur le plan cognitif (écouter la radio, lire, jouer à des jeux, aller au théâtre). Celles qui disaient beaucoup pratiquer ces activités réussissaient mieux les tests cognitifs que les autres. Une analyse diachronique a même montré que ces stimulations cognitives diminuaient le risque de développer la maladie d'Alzheimer.

Certains types de vie permettent de conserver un fonctionnement cognitif stable en vieillissant; des stratégies délibérées d'entraînement cognitif peuvent-elles porter leurs fruits? La question est d'un intérêt indéniable. Des personnes âgées s'entraînent à réussir une tâche cognitive donnée, pour laquelle ils ont subi une baisse d'efficacité en vieillissant, et on cherche à déterminer s'ils s'améliorent aussi sur des tâches apparentées.

C.7.2. La formation : les perspectives pour le développement

Du point de vue du développement, on s'aperçoit qu'une vie (l'école puis le travail, la rencontre d'un partenaire, la naissance des enfants, l'évolution de la carrière, les problèmes rencontrés, la retraite) peut se décomposer en « tâches de développement » successives (Lehr, 1986; Kruse, 1999). À chaque étape de la vie correspondent certains types de développement, qui dépendent 1) de la maturité biologique et psychologique, 2) de ce que la société attend d'une personne de cet âge et 3) des intérêts propres à l'individu et des occasions d'apprentissage qu'il rencontre. Ses expériences passées et sa situation présente concourent à la réalisation du potentiel de développement (voir Tippelt, 2002).

Une récente étude diachronique portant sur 1 958 individus entre 30 et 49 ans a mis en évidence que toute forme d'éducation était bénéfique (Schuller et autres, 2004). La littératie et la numératie ont des influences positives sur l'hygiène de vie (consommation d'alcool et de tabac, sport, indice de masse corporelle), le bien-être (dépression, satisfaction, santé générale) et l'implication politique (intérêt pour la politique, participation aux scrutins, sens de la citoyenneté). L'éducation a même tendance à rendre moins raciste, en tout cas les hommes (voir Bynner, Schuller et Feinstein, 2003). Ceux qui ont suivi des études supérieures sont proportionnellement plus nombreux à faire du bénévolat. La fréquentation assidue des formations pour adultes a des effets positifs sur l'hygiène de vie, la tolérance et la citoyenneté. En revanche, les cours d'agrément n'ont pas d'effet préventif sur la dépression. Les conclusions sont évidentes : l'éducation est d'une importance fondamentale pour le bien-être de tous, et pour la cohésion sociale (voir Feinstein et autres, 2003).

Ces études sur des adultes sont valables aussi pour les personnes âgées, dont le niveau d'éducation et les connaissances déjà acquises sont importants pour l'apprentissage ultérieur (voir Becker, Veelken et Wallraven, 2000). On parle beaucoup en ce moment de « vieillissement réussi », et cette idée a en partie remplacé le modèle de « déficit » des décennies passées. On considère aujourd'hui que les compétences et la capacité d'action peuvent être conservées très longtemps. Les façons d'apprendre changent, mais on peut toujours apprendre (voir Schaie, 2005; Baltes et Staudinger, 2000). En dépit du déclin des processus sensoriels et cognitifs (décrit en section C.2) et des structures cérébrales correspondantes (décrit en sections C.3 et C.4), le savoir préalablement acquis n'est pas

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

forcément perdu et peut être réutilisé dans de nouveaux apprentissages. Qu'il vienne de contextes formels (les structures d'éducation) ou informels (famille, travail, environnement social), il peut être mis à profit et fournir la base nécessaire à toute stratégie d'apprentissage, à l'âge adulte et durant la vieillesse (Kruse, 1999).

La conscience de soi-même et le sens de sa propre identité sont importants pour le développement des adultes – surtout l'expérience et les émotions liées aux souvenirs personnels, qui permettent une conception globale du développement (comprenant la durée de vie, le développement cérébral, l'environnement social, les contextes d'apprentissage et la prédisposition génétique). D'une manière surprenante, les chercheurs en sciences de l'éducation ont assez peu étudié l'aspect émotionnel des souvenirs (voir Welzer et Markowitsch, 2001, p. 212).

Le développement est un processus qui ne concerne pas seulement l'enfance et la jeunesse; il dure toute la vie. Les adultes sont néanmoins davantage responsables de leurs choix d'apprentissage (apprendre ou non, quoi apprendre, et comment apprendre : voir Tippelt, 2000). En psychologie, les recherches sur la motivation parlent d'« état de flux » (Csikszentmihalyi, 1982), du plaisir de « ne plus sentir le temps passer » alors qu'on pratique, apparemment sans effort, une activité difficile. Cette même sensation a été décrite par White (1959) comme « le sentiment d'efficience », par deCharms (1976) comme « prendre conscience de sa propre efficacité » ou « l'auto-détermination » et par Heckhausen (1989) comme « la conformité de l'action et de l'objectif recherché ». D'ailleurs, avoir conscience d'être efficace, et reconnaître qu'on est responsable de ses propres résultats, améliorent les capacités cognitives (voir Jennings et Darwin, 2003).

Le concept de sagesse occupe une place particulière; on considère que c'est le but idéal du développement humain, même si on rencontre très peu de gens dotés d'un haut niveau de connaissances à ce sujet. La fin de l'adolescence et le début de l'âge adulte constituent la principale période pour apprendre des choses dans ce domaine. La sagesse se fonde sur les efforts conjoints de l'esprit et des qualités morales en faveur du bien public et de l'équilibre personnel. Les facteurs cognitifs tels que l'intelligence ne sont pas les plus pertinents dans la quête de la sagesse (Sternberg, 1990). Comptent bien davantage les expériences de vie spécifiques (par exemple, être amené dans son travail à gérer des situations de vie complexes), et la personnalité (ouverture d'esprit face aux nouvelles expériences, créativité, tendance à comparer, évaluer et analyser l'information reçue) (Baltes, Glück et Kunstmann, 2002; Baltes et Staudinger, 2000).

Du point de vue du développement, il est intéressant de noter que la compétence dont disposent les personnes âgées comprend bien des savoir-faire et des intérêts qui leur permettent de conserver leur indépendance. Par « compétence », on entend la capacité d'une personne à conserver (ou à recréer) un mode de vie actif, doté de sens et de contacts sociaux, dans un environnement positif qui pousse à se confronter à la vie d'une façon énergique et lucide (Kruse, 1999, p. 584). La mise en œuvre de la compétence est donc toujours liée à des caractéristiques positives de l'environnement social et institutionnel. D'éventuels handicaps ou limitations doivent donc être pris en compte de façon complète et techniquement efficace, à la fois par les individus et par les structures sociales.

La compétence est également liée au *capital humain*, similaire à d'autres ressources économiques. Dans le domaine professionnel, les plus de cinquante ans disposent d'un excellent capital humain que notre société tertiaire ne met pas assez à profit. Ils sont perçus comme moins flexibles, moins stables (en raison de leur santé), mais beaucoup de DRH

mettent en avant leur grande expérience professionnelle, leur endurance intellectuelle, leur loyauté, leur solidité, leur excellente capacité à prendre les bonnes décisions et à agir en conséquence, ainsi que leur compétence sociale et leurs talents de communication (Lahn, 2003; Karmel et Woods, 2004; Williamson, 1997; Wrenn et Maurer, 2004). D'ailleurs, les problèmes de santé surviennent surtout quand les lieux de travail ne sont pas adaptés et ne fournissent pas de possibilités d'apprentissage (Baethge et Baethge-Kinsky, 2004; Feinstein et autres, 2003). Les programmes de formation destinés aux seniors ont des fonctions préventives, et assurent le maintien des capacités cognitives autant que de la santé physique et mentale (Lehr, 1991; Altenkommission, 2005). Mais il faut continuer à analyser les résultats (à court terme) et les effets (à long terme) des études diachroniques pour disposer d'une base empirique solide quant au bilan des différents types de formation.

Les programmes « Revenir après 45 ans » sont de bons exemples de mesures utiles. Ils sont surtout destinés aux femmes, car dans beaucoup de pays, on trouve peu de femmes de plus de cinquante ans dans les entreprises (Eurostat, 2003). Dans l'Union européenne, c'est la Suède qui a le meilleur taux d'emploi de personnes de plus de 50 ans (75 %), et la Belgique le plus bas (42 %). Ces chiffres, peu élevés, sont en contradiction avec le fort potentiel de cette catégorie d'employés. Plusieurs mesures éducatives ont prouvé empiriquement qu'elles leurs permettraient de recommencer à travailler – à condition que les entreprises mettent à profit leurs compétences et tiennent compte de leurs faiblesses (Kruse, 2005) :

- Techniques de communication sociale : dialogues en groupes, coopération, travail en équipe, formation à la recherche d'emploi, formation à la négociation.
- Entraînement cognitif : entraînement à l'apprentissage, développement de la mémoire, application de stratégies cognitives connues, acquisition de nouvelles compétences de résolution de problèmes, pensée synthétique et conceptuelle, entraînement à la planification.
- Connaissance des technologies de l'information et de la communication : recherche active d'informations pertinentes, échange et stockage de connaissances.
- Approfondissement des expériences pratique et des stages : transfert de connaissance, travail sur la motivation et la confiance en soi.
- Connaissances générales du marché du travail et du nouveau rôle des employés : stratégies de retour dans l'entreprise, perspective d'emploi à l'âge mûr, rôle dans la famille et au travail.

Ces cours ont atteint leurs objectifs cognitifs et sociaux; capacités de concentrations, vitesse d'action et qualités de dialogue se sont améliorées chez les participants. Les effets sur la santé comprennent la diminution sensible de certaines attitudes névrotiques (peur, irritabilité, humeurs dépressives, sentiment de vulnérabilité); les situations de conflit, de stress et de crises sont mieux gérées grâce à une meilleure stabilité mentale. Ces mesures sont donc concluantes; mais elles montrent à quel point sont grandes les tensions générées par un milieu exigeant.

On peut dire que globalement (voir Barz et Tippelt, 2004), en ce qui concerne l'apprentissage tout au long de la vie, et plus particulièrement l'implication dans des formations professionnelles, il existe des inégalités très nettes selon le niveau d'études, les qualifications, le type d'emploi occupé, le sexe, la nationalité, l'âge et le mode de vie. Il faut donc proposer différents environnements d'apprentissage, adaptés à chaque type d'individus. Les « barrières » souvent évoquées dans les études empiriques *ne sont pas*

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

fondamentalement dues aux capacités d'apprentissage des seniors; elles soulèvent en revanche des questions quant aux « structures des possibilités offertes » par l'éducation destinée aux adultes. Plus les gens vieillissent, moins ils participent aux programmes de formation, surtout quand ceux-ci sont liés à leur vie professionnelle, ce qui ne se justifie pas sur le plan de la théorie de l'apprentissage. Les universitaires sont l'exception à ce phénomène puisqu'en prenant de l'âge, ils participent *davantage* aux programmes de formation. Les entreprises ont donc tort de ne pas suffisamment intégrer les seniors à la formation continue.

C.8. L'apprentissage pour adultes : créer des environnements favorables

Les conditions d'apprentissage et les méthodes didactiques doivent naturellement tenir compte des conclusions auxquelles ont abouti les théories de l'apprentissage, la pédagogie des adultes et la gérontologie. Cela signifie que trois concepts modernes sont particulièrement importants : l'apprentissage fondé sur les compétences, l'apprentissage constructiviste et l'apprentissage *in situ*.

C.8.1. L'apprentissage fondé sur les compétences : pour préparer à résoudre des problèmes

Dans la formation des adultes, le terme « compétence » vient d'un débat sur les caractéristiques des études techniques (Achatz et Tippelt, 2001). Depuis, il s'est répandu dans les domaines de l'école et de la formation continue. Il a été utilisé pour des comparaisons internationales de systèmes éducatifs (OCDE, 2004; PISA) et dans le cadre d'actions destinées à mettre en place des standards nationaux; la « compétence » définit à présent le but d'un apprentissage. Weinert (2001) définit les compétences comme « les aptitudes et les savoir-faire cognitifs permettant de résoudre certains problèmes, et comme la capacité à profiter de la motivation, de la volonté et de l'environnement qui y sont associés, d'une façon efficace et responsable dans des situations diverses » (*ibid.*, p. 27 et suivantes). Les compétences sont donc la mesure d'un apprentissage réussi – et inversement, l'acquisition de compétences est le but de toute action d'éducation. Pour cela, il faut qu'enseignants et apprenants changent la façon dont ils perçoivent leurs rôles – accorder plus de responsabilités et d'autonomie aux apprenants, et attribuer aux enseignants un rôle de soutien : accompagnement, aide et réflexion (voir Achatz et Tippelt, 2001, p. 124 et suivantes). Pour créer des compétences, il peut être utile d'employer conjointement plusieurs approches; apprendre *via* des activités concrètes et des problèmes pratiques, mettre en relation les contenus avec des contextes pertinents, par exemple. Fondamentalement, il convient de respecter l'autonomie de celui qui apprend et de favoriser la coopération, ainsi que de s'attacher à utiliser des méthodes variées. Dans ce contexte, l'apprentissage lié à un projet (présent dans les modèles de formation opérationnelle des entreprises) se révèle particulièrement adapté.

C.8.2. L'apprentissage constructiviste : mettre à profit des expériences subjectives

Au cours des réflexions théoriques de ces deux dernières décennies se sont fait entendre les deux fondateurs de la philosophie de l'apprentissage constructiviste : Maturana et Varela (voir Siebert, 1998). Leurs idées sont la pierre angulaire de la théorie de l'apprentissage constructiviste, et ont été confirmées par de récentes découvertes en neuroscience (par exemple Spitzer, 2002; Siebert et Roth, 2003).

D'un point de vue constructiviste, l'apprentissage est toujours individuel et basé sur l'expérience. Les nouvelles connaissances reprennent toujours des savoirs déjà existants, en les transformant et en les affinant. L'augmentation des connaissances se fait lors d'expériences nouvelles, ou par l'analyse critique de ses propres constructions cognitives et leur mise en rapport avec celles des autres. L'apprentissage doit en tenir compte des façons suivantes (voir Tippelt et Schmidt, 2005) :

- La création de savoir ne peut pas être due à la seule initiative de l'enseignant; elle relève tout autant de la responsabilité de l'apprenant. Les enseignants doivent fournir les ressources nécessaires, et proposer des environnements stimulants (les cours donnés sont bien sûr importants, mais pas fondamentaux).
- Les échanges favorisent le processus d'apprentissage; il faut donc les encourager.
- L'apprentissage basé sur les problèmes rencontrés est efficace, et permet d'acquérir des connaissances axées sur les réalisations concrètes.
- Les nouveaux apprentissages devraient toujours s'appuyer sur les connaissances déjà acquises. Une classe organisée selon les principes du constructivisme pourrait par exemple, avant d'étudier un sujet, encourager les élèves à y réfléchir, à discuter de leurs expériences et de leurs opinions à son sujet.

Les résultats obtenus en neuroscience sont de plus en plus intégrés à la recherche pédagogique; ils lui sont complémentaires. Il ne s'agit pas d'un effet de mode (Stern, 2004; Pauen, 2004). Les études neurobiologiques ont montré que c'est durant l'enfance et la jeunesse que le cerveau se structure, mais des modifications structurelles et fonctionnelles continuent à se produire à l'âge adulte et jusqu'à la mort, même si elles sont moins importantes qu'au début de la vie (sauf dans les cas de démence sénile). Étant donné qu'avec l'âge, l'efficacité du traitement des informations évolue, les personnes âgées mettent plus de temps à apprendre, mais leurs connaissances déjà acquises sont de mieux en mieux différenciées, et de plus en plus précises (voir Spitzer, 2002, ainsi que les sections C.4 et C.5 du présent article). L'importance de l'attention, de la motivation et de l'émotion dans un apprentissage réussi a été soulignée par les chercheurs en neuroscience (Singer, 2002), et corrobore les recherches en pédagogie.

L'apprentissage correspond souvent à la création de sens. Pour apprendre, il faut interpréter des impressions sensorielles. Le sens ainsi construit entraîne la création de nouvelles synapses, ce qui permet d'apprendre (Roth, 2004). La neurobiologie confirme et enrichit les théories de l'apprentissage constructiviste, et montre qu'un environnement d'apprentissage adapté est très important. C'est d'ailleurs le rôle premier des enseignants. Établir des conditions qui favorisent l'apprentissage et qui prennent en compte les spécificités du groupe d'apprenants, et respecter des principes didactiques adaptés est plus important que la façon dont ils présentent les choses.

C.8.3. *L'apprentissage* in situ : *organiser les environnements d'apprentissage*

Plusieurs approches se sont développées à partir de la notion d'apprentissage constructiviste, et l'ont précisée. L'apprentissage *in situ* est l'une d'elles, et nous l'avons choisi parce qu'il repose sur des idées issues des théories de l'apprentissage et parce qu'il a déjà été largement mis en pratique. Il insiste sur l'importance du contexte d'apprentissage.

L'apprentissage *in situ* considère que, puisque les connaissances sont toujours acquises dans un contexte précis, l'application de ces connaissances ne peut pas être indépendante des conditions d'acquisition. Plus les contextes d'apprentissage et

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

d'application sont similaires, mieux on arrive à agir à partir de ses connaissances. Mais les adultes – à la différence des enfants et des adolescents – n'apprennent en général pas à l'école, mais dans des entreprises ou des institutions où ils sont censés appliquer ce qu'ils apprennent. C'est donc un avantage pour eux, et c'est ce que prône l'apprentissage *in situ*. Il importe de créer des champs d'applications possibles pour tout apprentissage. Pour cela, on peut s'inspirer de perspectives variées : la *flexibilité cognitive* (examiner un problème depuis une large gamme de perspectives), l'*accompagnement cognitif* (résoudre des problèmes de façon indépendante) et l'*enseignement ancré* (intégrer les contenus à des problèmes complexes). Nous allons brièvement développer ces deux dernières notions (voir Tippelt et Schmidt, 2005).

L'accompagnement cognitif vient de l'apprentissage artisanal traditionnel : au début l'élève suit des instructions précises, et à mesure qu'il progresse on attend de lui qu'il soit de plus en plus autonome. Dès le début, il est confronté à des tâches complexes, mais un expert lui explique comment s'y prendre. Dans un second temps, l'expert – ici, l'enseignant – se contente de le guider et de l'aider. Le formateur intervient de moins en moins, pour finalement n'être plus qu'un observateur. Cette approche est largement basée sur la formulation de stratégies par l'apprenant : on l'encourage à expliciter ses actes et à s'exprimer sur les méthodes qu'il emploie.

L'enseignement ancré a lui aussi fait ses preuves. Il consiste à placer les contenus enseignés dans des contextes complexes et authentiques, afin que l'apprenant soit amené à analyser le problème par lui-même, et à explorer ce qu'il apprend. « Authentiques » signifie que les problèmes qu'on lui présente sont tirés de la vie quotidienne et réelle, et « complexes » qu'ils ne sont pas réduits aux aspects qui concernent le sujet étudié : c'est à l'élève de déterminer les éléments pertinents dans l'ensemble de ce qu'on lui fournit. Rien n'est donc centré sur l'enseignant; un travail autonome est nécessaire, de la part d'adultes comme de plus jeunes élèves. L'enseignant guide et fournit l'aide contextuelle, parfois en allant jusqu'à donner des instructions (Tippelt et Schmidt, 2005). À force, les élèves développent des stratégies générales de résolution de problèmes en apprenant à classifier les différents types de tâches et de solutions : ils mettent au point des schémas globaux.

On voit bien que des stratégies adaptées à l'apprentissage des adultes existent. Il ne faut cependant pas négliger le fait que le vieillissement semble s'accompagner de modification dans la priorité attribuée aux processus et dans l'efficacité des stratégies d'apprentissage, ni oublier que les seniors compensent le déclin de leur fonctionnement cognitif élémentaire en faisant appel à leur connaissance supérieure du monde – maîtrise sémantique et richesse de l'expérience. Il est fondamental de comprendre que la plasticité du cerveau ne concerne pas que les jeunes : elle perdure à l'âge adulte et très tard dans la vie.

C.9. Programme de travail

Les sciences sociales et la neuroscience ont montré que la cognition varie avec l'âge, que la performance intellectuelle est (historiquement et ontogénétiquement) plastique, et qu'on ne peut développer une stratégie d'apprentissage efficace qu'en opérant la synthèse des sciences de l'éducation et de la recherche sur le cerveau. Mais celles-ci ont chacune leurs propres buts, des perspectives et des langages différents, et à l'avenir, l'apprentissage basé sur la compétence devra être entendu d'une façon plus profonde et plus riche, qui englobe les deux approches.

L'analyse des contraintes et des difficultés d'apprentissage que rencontrent certains groupes d'apprenants vieillissant est particulièrement pertinente pour une approche duelle. Le bien-être physique, mental et social des seniors est un sujet capital en recherche sur l'éducation. La neuroscience a prouvé (d'une façon plus approfondie que les sciences de l'éducation et la psychologie) que tout apprentissage déjà acquis améliore les apprentissages ultérieurs. C'est en analysant les possibilités et les limites du cerveau que neuroscientifiques et chercheurs en sciences de l'éducation pourront mieux comprendre pourquoi certains environnement d'apprentissage portent leurs fruits alors que d'autres ne sont pas efficaces.

L'optimisme le plus élémentaire pousse à se demander quel bénéfice les générations futures pourront tirer du vieillissement. Dans la société, mettre en valeur le potentiel des personnes âgées implique l'existence de contacts intergénérationnels riches, puisque l'apprentissage n'a de sens que si la société encourage la solidarité des générations (voir Tippelt, 2000). Ainsi, il faudrait que la recherche démontre que travailler et apprendre en équipe composée de personnes de tous âges est une bonne chose, et que les entreprises ont tout intérêt à employer des gens d'âges variés. Il est également important de rendre plus flexible le passage à la retraite, car les seniors sont loin d'avoir tous les mêmes motivations, les mêmes désirs, les mêmes potentiels cognitifs. Des études sur le sujet seraient très utiles. On ne peut pas faire l'économie d'un apprentissage différencié qui mette en avant les compétences de chacun, et qui englobe l'ensemble de la vie : un beau sujet de réflexion à la fois pour la neuroscience et pour les sciences de l'éducation.

Raja Parasuraman et Rudolf Tippelt

C.10. Réactions du praticien

La neuroscience et la recherche en sciences de l'éducation sont des domaines très éloignés du quotidien des enseignants. L'article « Cerveau, cognition et apprentissage à l'âge adulte » de Raja Parasuraman et Rudolf Tippelt ne passionnera pas forcément tous les enseignants, parce qu'il aborde l'apprentissage chez les adultes du point de vue scientifique. Mais pour quelqu'un comme moi, il est réconfortant de voir que les découvertes réalisées soutiennent mes conclusions et mes observations.

Un enseignant a bien conscience des données et des résultats de l'éducation formelle, mais doit se contenter d'intuitions quant à ce qui se passe dans le cerveau des apprenants. En d'autres termes, un bon enseignant connaît bien le processus d'enseignement, et peut généralement constater et évaluer les acquisitions qui en résultent. Mais il ne voit pas les processus cérébraux qui constituent l'apprentissage proprement dit, et peut, au mieux, essayer de reconstituer *a posteriori* les mécanismes qui y président. Il est donc rassurant de voir que la recherche sur le cerveau et sur l'éducation confirme ces intuitions, et que l'article vient compléter les idées émises par les linguistes et les professeurs de langue. La section C.8, qui traite de la création d'environnements favorables à l'apprentissage, corrobore les pratiques éducatives que je connais bien.

Mon expérience professionnelle est certes bien plus restreinte que celle envisagée par Parasuraman et Tippelt. J'enseigne l'anglais à des adultes dont ce n'est pas la langue maternelle. Mes commentaires sur cet article se placent donc dans ce cadre-là.

Mon activité comporte deux parties, l'ALE (anglais langue étrangère) et l'ASL (anglais langue seconde). Les étudiants d'ALE vivent dans des pays où ils n'utilisent pas l'anglais au quotidien. J'ai enseigné l'ALE au Mexique, en France, en Jordanie, en Palestine, en Indonésie

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

et au Pays-Bas. L'ASL, en revanche, concerne des adultes qui se sont installés ou viennent faire leurs études dans un pays anglophone (dans les cas qui me concernent, le Royaume-Uni et le Canada), et qui pour leur vie de tous les jours ont besoin de maîtriser l'anglais.

J'ai aussi formé de futurs enseignants d'ALE et d'ASL en Jordanie, au Mexique, en Indonésie, au Canada et en Chine, qu'il s'agisse de gens qui n'avaient jamais enseigné les langues (formation initiale) ou de professeurs d'anglais déjà en activité (formation continue).

Chacune de ces expériences, quels que soient le pays et l'époque, m'a confirmé une chose : l'apprentissage à l'âge adulte est une réalité. Le neuromythe qui veut que le cerveau adulte ne soit plus capable d'apprendre se voit en permanence réfuté par la réussite des expériences d'apprentissage. Des adultes de 20, 40 ou 60 ans ont évidemment pu créer de nouveaux neurones, ce qui corrobore les idées exposées dans l'article.

Celui-ci passe néanmoins sous silence un élément de la formation des adultes que je trouve fondamental. On voit « comment » apprennent les adultes – et donc comment optimiser leurs apprentissages – en fonctions de paramètres précis tels que l'âge, l'hérédité et les possibilités offertes. Dans cette présentation générale de l'apprentissage vu par les neuroscientifiques et les chercheurs en sciences de l'éducation, la question du « quoi » n'est pas abordée. Le sujet étudié peut aller de l'histoire de l'art à l'informatique en passant par la gymnastique. On peut supposer que le principal médium pour enseigner et apprendre ce sujet est la langue commune à l'enseignant et à l'apprenant, qu'il s'agisse du japonais, du néerlandais ou de n'importe quelle autre langue. Le « comment » et le « quoi » sont donc deux entités totalement distinctes. Ce fut longtemps le cas pour l'enseignement de l'anglais – et c'est malheureusement toujours vrai dans de nombreux pays – car les cours se déroulaient dans la langue maternelle de l'étudiant, avec une forte dose de cours magistraux et une grande importance accordée aux cours de grammaire, de version et de thème. Cette tradition pédagogique a ses racines dans une conception ancienne et bien ancrée de l'enseignement des langues.

Concrètement, cette méthode a eu – a encore – des résultats désastreux : de jeunes adultes qui ont suivi durant leur adolescence entre 1 000 et 2 000 heures de cours d'anglais (sans compter les devoirs), et qui arrivent dans des pays où ils ont besoin de parler anglais s'aperçoivent souvent que tout le travail qu'ils ont fourni ne leur sert à rien. Le plus souvent ils ne comprennent pas ce qu'on leur dit, sont incapables de tenir une conversation de longueur moyenne, n'ont pas le niveau nécessaire pour lire et apprécier ne serait-ce qu'une nouvelle, ne peuvent rédiger une lettre qui ne soit truffée d'erreurs, et leur mauvaise prononciation déroute leurs interlocuteurs. Cela montre que la *façon* dont ils ont appris ne leur a pas permis de maîtriser le *contenu* qu'on a voulu leur enseigner. On n'aboutit qu'à une perte de temps, d'argent, d'énergie, d'effort intellectuel, d'infrastructures et de ressources humaines.

Mais depuis quelques décennies, de plus en plus de professeurs d'anglais (et plus généralement de langues) se sont éloignés de cette approche traditionnelle. La prise de conscience du fait que l'anglais est un outil de communication important a peu à peu fait évoluer les pratiques. La langue maternelle de l'apprenant n'est plus utilisée comme un outil permettant d'atteindre un objectif (parler anglais). Le « comment » et le « quoi » se sont confondus, et la distinction entre médium et message s'est estompée. L'étudiant qui veut apprendre à parler anglais utilise l'anglais pour atteindre son but. Ses compétences élémentaires servent de fondation aux premiers progrès, qui lui permettent ensuite d'améliorer encore sa maîtrise langagière. L'apprentissage n'est pas seulement une

augmentation des connaissances (vocabulaire, règles de grammaire, d'orthographe et de prononciation); c'est surtout l'acquisition de compétences permettant la communication (parler, écouter, lire et écrire). L'accumulation de connaissances factuelles se voit remplacée par le développement de capacités langagières.

Une telle méthode d'enseignement exige un professeur compétent et bien formé. Il doit guider sa classe d'étape en étape, travailler à partir des connaissances et des compétences déjà existantes, permettre le développement des compétences purement linguistiques (exactitude et maîtrise de la langue) mais aussi faire en sorte que les élèves prennent confiance en eux et restent motivés tout au long de leur apprentissage.

Les enseignants ont évidemment besoin de formations bien conçues : le TEFL (enseignement de l'anglais comme langue étrangère), le TESL (enseignement de l'anglais comme seconde langue) et plus généralement le TESOL (enseignement de l'anglais à des locuteurs d'autres langues). Durant leurs études, les futurs professeurs ne s'occupent plus d'abord des aspects linguistiques; ils doivent se concentrer sur une approche éducative dans laquelle l'anglais est l'outil de communication permettant d'enseigner l'anglais.

Ces vingt dernières années, j'ai eu la chance de beaucoup m'occuper de formation d'enseignants. Ceux que j'ai formés venaient de différentes régions du monde, et leur niveau d'anglais, leur langue maternelle, leur formation, leur motivation, leur culture et leur nationalité étaient très différents. Mais l'apprentissage était leur point commun. Tous ont réussi à apprendre, et, plus important encore, ils ont compris les principes sous-jacents de l'enseignement de l'anglais comme langue étrangère.

Quel est donc, au fond, le dénominateur commun à toutes les formations de professeurs d'anglais langue étrangère (ou, par extension, de n'importe quelle langue étrangère)? À quels principes devraient-elles toujours obéir? Quels éléments autrefois jugés nécessaires sont devenus inutiles? Quelles parties indispensables du TESOL devrait-on intégrer dans tous les cours? À mon avis, sept éléments doivent être sérieusement étudiés.

L'étude de l'anglais, de l'éducation et de la pédagogie doit être conservée, puisqu'un professionnel doit bien connaître son sujet. Mais on doit cesser d'isoler cela de la pratique concrète des salles de classe. Beaucoup de formations comportaient une forte dose de théorie de l'éducation et de linguistique; cela n'est plus adapté. La théorie ne devrait être enseignée que si elle est utile (de façon directe ou indirecte) pour la pratique professionnelle. Si cela implique de supprimer les cours de littérature médiévale ou de linguistique du vieil anglais, allons-y.

Cela débouche sur un autre principe : toute théorie doit être associée à la pratique. Dans le TESOL, il n'y a pas de place pour des grandes théories qui seront inutiles à l'enseignant. Il faudrait n'étudier la théorie que dans la mesure où elle sera concrètement utile. Si le programme ne peut pas montrer clairement la pertinence pratique d'un modèle théorique donné, alors il faut supprimer cette théorie du programme.

Il faut absolument mettre l'accent sur l'enseignement de méthodes et de techniques, et en expliciter le sens et le fonctionnement. Pour cela, l'étudiant doit avoir de nombreuses occasions de s'entraîner à enseigner, et le formateur doit abondamment revenir sur ce qui s'est déroulé. Ce processus exige un gros investissement en temps, en logistique et en ressources humaines; il doit donc être soigneusement mis au point. Les programmes doivent comporter des exercices pratiques, sous différentes formes, du début à la fin de la formation, que celle-ci s'étende sur quatre semaines seulement (comme lorsque je travaillais au Canada) ou sur quatre ans (comme le TEFL universitaire dans lequel j'ai enseigné au Mexique).

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Le formateur en TESOL doit donc suivre les principes qu'il cherche à transmettre aux futurs enseignants. Il est souhaitable qu'il ait lui-même une grande expérience comme professeur d'ALE/ASL. La façon d'enseigner (le « comment ») doit toujours correspondre au contenu du programme de formation (le « quoi »). Il faut donc que toutes les techniques abordées lors de la présentation de modèles théoriques soient effectivement utilisées durant les séances correspondantes. Ainsi, si on explique que les discussions par groupes de deux, ou les jeux de rôles, sont très utiles en classe, il faut faire pratiquer aux futurs enseignants les discussions par deux ou les jeux de rôles. La foi que le formateur a en ce qu'il enseigne se mesure à la méthode qu'il emploie. Il est inenvisageable que le formateur se cantonne à des cours magistraux. « Fais ce que tu dis » est un principe fondamental.

Un élément très efficace – et, pour moi, indispensable – pour permettre à nos étudiants de comprendre différents aspects de leur métier est de leur faire découvrir une langue étrangère qui ne leur est pas familière. Ils sont donc dans la position d'un apprenant débutant face à une langue totalement nouvelle – le serbo-croate, l'arabe, l'espagnol ou l'hébreu, par exemple. Ils développent alors une forte empathie avec leurs futurs élèves, et se rendent compte de ce que ceux-ci attendront d'eux; ils voient à quel point il est ardu et intimidant d'aborder une nouvelle langue; combien il est gratifiant d'aboutir à des résultats, même modestes; combien l'expressivité, le langage corporel et le mime aident à la compréhension; combien la patience et les encouragements du professeur sont importants; et enfin, qu'il est tout à fait possible d'utiliser uniquement la langue enseignée sans jamais revenir à la langue maternelle des apprenants. Cette expérience peut ne durer qu'une demi-heure, ou s'étendre sur dix semaines à raison de deux heures par semaine et comprendre diverses tâches de réflexion et d'analyse (discussions par petits groupes, étude des réactions émotionnelles, tenue d'un journal personnel…). Dans ma pratique professionnelle, les étudiants ont tiré de cette pratique des leçons d'une valeur inestimable. Elle est d'autant plus importante pour des futurs professeurs d'anglais dont la langue maternelle est l'anglais, et qui n'ont donc pas eu à apprendre l'anglais dans une salle de classe.

Ils doivent également maîtriser les techniques d'apprentissage, en fonction de leurs habitudes antérieures. Certaines sont efficaces, d'autres non. S'ils ne comprennent pas bien cela (par exemple à cause de leur habitude d'une pédagogie inadaptée durant leurs études : bachotage intensif et tardif, réticences à employer la langue étudiée, rabâchage et « par cœur »), ils doivent d'abord « apprendre à apprendre » : comment prendre des notes, effectuer des recherches bibliographiques, réfléchir de manière analytique, exprimer une opinion, résoudre un problème, etc. On ne peut escompter qu'un professeur enseignera les bonnes techniques s'il ne les utilise pas lui-même.

Enfin, si la langue maternelle des étudiants n'est pas l'anglais, il faut améliorer leur maîtrise de cette langue. Pour la formation initiale, les étudiants comprennent souvent que c'est important, et apprécient de suivre la formation en anglais afin de progresser. Très peu de cours – voire aucun – devraient donc se dérouler dans une autre langue, même si le formateur a la même langue maternelle que ses étudiants. En revanche, dans le cas de la formation continue, les étudiants pensent avoir un bon niveau d'anglais et sont réticents à l'idée d'y travailler. Pourtant, ils en ont souvent besoin malgré leur expérience, même s'ils s'en rendent rarement compte.

Pour résumer, les principes les plus importants que doivent respecter les programmes de formation pour futurs enseignants d'anglais langue étrangère sont :

1. Toute théorie doit avoir une utilité concrète pour l'enseignement.

2. Théorie et pratique sont étroitement mêlées.
3. La formation doit comporter une pratique de l'enseignement.
4. Les formateurs doivent appliquer les conseils qu'ils donnent.
5. Le programme comprend un cours de langue étrangère non familière.
6. Si nécessaire, on enseigne comment apprendre.
7. Le niveau d'anglais des étudiants doit être amélioré si nécessaire.

Les responsables des programmes de TESOL doivent absolument faire en sorte que les apprenants puissent apprendre et être formés de la meilleure façon possible. Une fois qu'ils seront professeurs d'anglais langue étrangère, ils donneront l'exemple à leurs élèves, leur enseigneront l'anglais et les prépareront pour l'avenir. À l'aide des découvertes scientifiques, nous pouvons utiliser les ressources dont nous disposons de manière à optimiser l'efficacité des environnements d'apprentissage pour adultes. Il est grand temps de s'y atteler.

Liet Hellwig

Références

Achatz, M. et R. Tippelt (2001), « Wandel von Erwerbsarbeit und Begründungen kompetenzorientierten Lernens im internationalen Kontext », dans A. Bolder, W. Heinz et G. Kutscha (éd.), *Deregulierung der Arbeit – Pluralisierung der Bildung?*, Leske & Budrich, Opladen, pp. 111-127.

Achtenhagen, F. et W. Lempert (éd.) (2000), *Lebenslanges Lernen im Beruf – Seine Grundlegung im Kindes- und Jugendalter*, Bd. 1-5, Leske & Budrich, Opladen.

Alterskommission (2005), « Zusammenfassung wesentlicher Thesen des Fünften Altersberichts », Berlin.

Baethge, M. et V. Baethge-Kinsky (2004), *Der ungleiche Kampf um das lebenslange Lernen*, Waxmann, Münster/New York/Münich et Berlin.

Ball, K., D.B. Berch, K. Helmers, J. Jobe, M. Leveck, M. Marsiske, J. Morris, G.W. Rebok, D.M. Smith, S.L. Tennstedt, F. Unverzagt et S. Willis (2002), « Effects of Cognitive Training Interventions with Older Adults. A Randomized Controlled Trial », *JAMA 288*, pp. 2271-2281.

Baltes, P.B. (1993), « The Aging Mind: Potential and Limits », *The Gerontologist*, vol. 33/5, pp. 580-594.

Baltes, P.B. (2003), « Das hohe Alter – mehr Bürde als Würde? », MaxPlanckForschung, vol. 2, pp. 15-19.

Baltes, P.B., J. Glück et U. Kunzmann (2002), « Wisdom: Its Structure and Function in Successful Lifespan Development », dans C.R. Snyder et S.J. Lopez (éd.), *Handbook of Positive Psychology*, Oxford University Press, New York, pp. 327-350.

Baltes, P.B. et U. Lindenberger (1997), « Emergence of a Powerful Connection between Sensory and Cognitive Functions across the Adult Life Span: A New Window to the Study of Cognitive Aging? », *Psychology and Aging*, vol. 12(1), pp. 12-21.

Baltes, P.B. et U.M. Staudinger (2000), « Wisdom: A Metaheuristic (pragmatic) to Orchestrate Mind and Virtue toward Excellence », *American Psychologist*, vol. 55, pp. 122-136.

Bartzokis, G., J.L. Cummings, D. Sultzer, V.W. Henderson, K.H. Nuechterlein et J. Mintz (2003), « White Matter Structural Integrity in Healthy Aging Adults and Patients with Alzheimer Disease: A Magnetic Resonance Imaging Study », *Archives of Neurology*, vol. 60(3), pp. 393-398.

Barz, H. et R. Tippelt (éd.) (2004), *Weiterbildung und soziale Milieus in Deutschland*, Bd.1 u.2, Bertelsmann, Bielefeld.

Becker, S., L. Veelken et K.P. Wallraven (éd.) (2000), *Handbuch Altenbildung. Theorien und Konzepte für Gegenwart und Zukunft*, Leske & Budrich, Opladen.

Bransford, J.D., A.L. Brown et R.R. Cocking (2004), *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*, Expanded Edition, National Academy Press, Washington, D.C.

Bruer, J.T. (1997), « Education and the Brain: A Bridge too Far », *Educational Researcher*, vol. 26(8), pp. 4-16.

Bynner, J., T. Schuller et L. Feinstein (2003), « Wider Benefits of Education: Skills, Higher Education and Civic Engagement », *Z.f.Päd.*, 49.Jg., vol. 3, pp. 341-361.

Cabeza, R. (2002), « Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults: The HAROLD Model », *Psychology and Aging*, vol. 17(1), pp. 85-100.

Cabeza, R., L. Nyberg et D.C. Park (2005), *Cognitive Neuroscience of Aging*, Oxford University Press, New York.

Cattell, R.B. (1963), « Theory of Fluid and Crystallized Intelligence: A Critical Experiment », *Journal of Educational Psychology*, vol. 54, pp. 1-22.

Cohen, J. (1988), *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (seconde édition), Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey.

Colcombe, S.J. et A. Kramer (2002), « Fitness Effects on the Cognitive Function of Older Adults: A Meta Analytic Study », *Psychological Science*, vol. 14, pp. 125-130.

Colcombe, S.J., A. Kramer, K.I. Erickson et P. Scalf (2005), « The Implications of Cortical Recruitment and Brain Morphology for Individual Differences in Inhibitory Function in Aging Humans », *Psychology and Aging*, vol. 20, pp. 363-375.

Courchesne, E., H.J. Chisum, J. Townsend, A. Cowles, J. Covington, B. Egaas et autres (2000), « Normal Brain Development and Aging: Quantitative Analysis at In Vivo MR Imaging in Healthy Volunteers », *Radiology*, vol. 216, pp. 672 – 681.

Csikszentmihalyi, M. (1982), « Towards a Psychology of Optimal Experience », dans R. Gross (éd.), *Invitation to Life-long Learning*, Fowlett, New York, pp. 167-187.

DeCharms, R. (1976), *Enhancing Motivation: Change in the Classroom*, Irvington, New York.

Deci, E.L. et R.M. Ryan (1985), *Intrinsic Motivation and Self-determination in Human Behavior*, Plenum Press, New York.

Dobbs, A.R. et B.G. Rule (1989), « Adult Age Differences in Working Memory », *Psychology and Aging*, vol. 4(4), pp. 500-503.

Erikson, E. (1966), *Identität und Lebenszyklus*, Francfort.

Eriksson, P.S., E. Perfilieva, T. Björk-Eriksson, A.-M. Alborn, C. Nordborg, D.A. Peterson et F.H. Gage (1998), « Neurogenesis in the Adult Human Hippocampus », *Nature Medicine*, vol. 4, pp. 1313-1317.

Espeseth, T., P.M. Greenwood, I. Reinvang, A.M. Fjell, K.B. Walhovd, L.T. Westlye, E. Wehling, A. Astri Lundervold, H. Rootwelt et R. Parasuraman (2007), « Interactive Effects of APOE and CHRNA4 on Attention and White Matter Volume in Healthy Middle-aged and Older Adults », *Cognitive, Behavioral, and Affective Neuroscience*.

Feinstein, L., C. Hammond, L. Woods, J. Preston et J. Bynner (2003), « The Contribution of Adult Learning to Health and Social Capital. Wider Benefits of Learning Research », rapport 8, Center of Research on the Wider Benefits of Learning, Londres.

Good, C.D., I.S. Johnsrude, J. Ashburner, R.N.A. Henson, K.J. Friston et R.S.J. Frackowiak (2001), « A Voxel-based Morphometric Study of Aging in 465 Normal Adult Human Brains », *Neuroimage*, vol. 14, pp. 21-36.

Grady, C.L., J.M. Maisog, B. Horwitz, L.G. Ungerleider, M.J. Mentis et J.A. Salerna (1994), « Age-related Changes in Cortical Blood Flow Activation during Visual Processing of Faces and Location », *Journal of Neuroscience*, vol. 14, pp. 1450-1462.

Grady, C.L., A.R. McIntosh et F.I. Craik (2003), « Age-related Differences in the Functional Connectivity of the Hippocampus during Memory Encoding », *Hippocampus*, vol. 13(5), pp. 572-586.

Greenwood, P.M. et R. Parasuraman (1994), « Attentional Disengagement Deficit in Nondemented Elderly over 75 Years of Age », *Aging and Cognition*, vol. 1(3), pp. 188-202.

Greenwood, P.M. et R. Parasuraman (1999), « Scale of Attentional Focus in Visual Search », *Perception and Psychophysics*, vol. 61, pp. 837-859.

Greenwood, P. et R. Parasuraman (2003), « Normal Genetic Variation, Cognition, and Aging », *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, vol. 2, pp. 278-306.

Greenwood, P.M., C. Lampert, T. Sunderland et R. Parasuraman (2005), « Effects of Apolipoprotein E Genotype on Spatial Attention, Working Memory, and their Interaction in Healthy, Middle-aged Adults: Results from the National Institute of Mental Health's BIOCARD Study », *Neuropsychology*, vol. 19(2), pp. 199-211.

Greenwood, P.M., T. Sunderland, J. Friz et R. Parasuraman (2000), « Genetics and Visual Attention: Selective Deficits in Healthy Adult Carriers of the 4 Allele of the Apolipoprotein E Gene », *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 97, pp. 1661-1666.

Gropengießer, H. (2003), « Lernen und Lehren: Thesen und Empfehlungen zu einem professionellen Verständnis », Report 3/2003, Literatur und Forschungsreport Weiterbildung, Gehirn und Lernen, pp. 29-39.

Guttmann, C.R., F.A. Jolesz, R. Kikinis, R.J. Killiany, M.B. Moss et T. Sandor (1998), « White Matter Changes with Normal Aging », *Neurology*, vol. 50, pp. 972-981.

de Haan, M. et M. Johnson (éd.) (2003), « The Cognitive Neuroscience of Development », *Psychology Press*, Hove.

Heckhausen, H. (1989), *Motivation und Handeln*, Springer, Heidelberg.

Hedden, T., G.J. Lautenschlager et D.C. Park (2005), « Contributions of Processing Ability and Knowledge to Verbal Memory Tasks across the Adult Lifespan », *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.

Jennings, J.M. et A.L. Darwin (2003), « Efficiacy Beliefs. Everyday Behavior, and Memory Performance among Elderly Adults », *Educational Gerontology*, vol. 29, pp. 34-42.

Jernigan, T.L., S.L. Archibald, C. Fennema-Notestine, A.C. Gamst, J.C. Stout et J. Bonner (2001), « Effects of Age on Tissues and Regions of the Cerebrum and Cerebellum », *Neurobiology of Aging*, vol. 22, pp. 581-594.

Johnson, M., Y. Munakata et R.O. Gilmore (éd.) (2002), *Brain Development and Cognition – A Reader*, Blackwell, Oxford.

Karmel, T. et D. Woods (2004), « Lifelong Learning and Older Workers », NCVER, Adelaïde.

Kemper, T. (1994), « Neuroanatomical and Neuropathological Changes in Normal Aging and in Dementia », dans M.L. Albert (éd.), *Clinical Neurology of Aging* (seconde édition), Oxford University Press, New York.

Keyfitz, N. (1990), *World Population Growth and Aging: Demographic Trends in the Late Twentieth Century*, University of Chicago Press, Chicago, IL.

Kruse, A. (1997), « Bildung und Bildungsmotivation im Erwachsenenalter », dans F.E. Weinert et H. Mandl (éd.), *Psychologie der Erwachsenenbildung*, Hogrefe, Göttingen, pp.115-178.

Kruse, A. (1999), « Bildung im höheren Lebensalter. Ein aufgaben-, kompetenz- und motivationstheoretischer Ansatz », dans R. Tippelt (éd.), *Handbuch der Erwachsenenbildung/ Weiterbildung*, Leske & Budrich, Opladen, pp. 581-588.

Kruse, A. (2005), « Qualifizierungsmaßnahmen für Wiedereinsteigerungen in den Beruf », Heidelberg (unveröffentl. Manuskript).

Kruse, A. et G. Rudinger (1997), « Lernen und Leistung im Erwachsenenalter », dans F.E. Weinert et H. Mandl (éd.), *Psychologie der Erwachsenenbildung*, Hogrefe, Göttingen, pp. 46-85.

Lahn, L.C. (2003), « Competence and Learning in Late Career », *European Educational Research Journal*, vol. 2/1, pp. 126-140.

Lehr, U. (1986), « Aging as Fate and Challenge », dans H. Häfner, G. Moschel et N. Sartorius (éd.), *Mental Health in the Elderly*, Heidelberg, pp. 57-77.

Lehr, U. (1991), *Psychologie des Alterns* (septième édition), Heidelberg.

Leibniz-Gemeinschaft (2005), « Wie wir altern: Megathema Alternsforschung », *Journal der Leibniz-Gemeinschaft*, pp. 6-13.

Lerner, R.M. (2002), « Concepts and Theories of Human Development », Lawrence Erlbaum, Malwah, NJ.

Li, K.Z., U. Lindenberger, A.M. Freund et P.B. Baltes (2001), « Walking while Memorizing: Age-related Differences in Compensatory Behavior », *Psychological Science*, vol. 12(3), pp. 230-237.

Lindenberger, U., H. Scherer et P.B. Baltes (2001), « The Strong Connection between Sensory and Cognitive Performance in Old Age: Not Due to Sensory Acuity Reductions Operating during Cognitive Assessment », *Psychology and Aging*, vol. 16(2), pp. 196-205.

Madden, D.J., T.G. Turkington, R.E. Coleman, J.M. Provenzale, T.R. DeGrado et J.M. Hoffman (1996), « Adult Age Differences in Regional Cerebral Blood Flow during Visual Work Identification: Evidence from H2 15O PET », *Neuroimage*, vol. 3, pp. 127-142.

Madden, D.J., W.L. Whiting, J.M. Provenzale et S.A. Huettel (2004), « Age-related Changes in Neural Activity during Visual Target Detection Measured by fMRI », *Cerebral Cortex*, vol. 14(2), pp. 143-155.

Nelson, C.A. et M. Luciana (éd.) (2001), *Handbook of Developmental Cognitive Neuroscience*, MIT Press, Cambridge, MA.

OCDE (2002), *Comprendre le cerveau – Vers une nouvelle science de l'apprentissage*, OCDE, Paris.

OCDE (2004), *Regards sur l'éducation – Les indicateurs de l'OCDE*, OCDE, Paris.

OCDE (2005), *Vieillissement et politiques de l'emploi – États-Unis*, OCDE, Paris.

OMS (2003), *Gender, Health, and Aging*, Organisation mondiale de la santé, Genève, Suisse.

Parasuraman, R., P.M. Greenwood, R. Kumar et J. Fossella (2005), « Beyond Heritability: Neurotransmitter Genes differentially Modulate Visuospatial Attention and Working Memory », *Psychological Science*, vol. 16(3), pp. 200-207.

Parasuraman, R., P.M. Greenwood et T. Sunderland (2002), « The Apolipoprotein E Gene, Attention, and Brain Function », *Neuropsychology*, vol. 16, pp. 254-274.

Park, D.C., G. Lautenschlager, T. Hedden, N. Davidson, A.D. Smith et P. Smith (2002), « Models of Visuospatial and Verbal Memory across the Adult Life Span », *Psychology and Aging*, vol. 17(2), pp. 299-320.

Park, D. et N. Schwarz (1999), *Cognitive Aging: A Primer*, Psychology Press, Hove.

Pate, G., J. Du et B. Havard (2004), « Instructional Design – Considering the Cognitive Learning Needs of Older Learners », *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*, vol. 1/5, pp. 3-8.

Pauen, S. (2004), « Zeitfenster der Gehirn- und Verhaltensforschung: Modethema oder Klassiker? », *Z.f.Päd.*, 50Jg., vol. 4, pp. 521-530.

Pillay, H., G. Boulton-Lewis, L. Wilss et C. Lankshear (2003), « Conceptions of Work and Learning at Work: Impressions from Older Workers », *Studies in Continuing Education*, vol. 25/1, pp. 95-111.

Raz, N., U. Lindenberger, K.M. Rodriue, K.M. Kennedy, D. Head et A. Williamson (2005), « Regional Brain Changes in Aging Healthy Adults: General Trends, Individual Differences and Modifiers », *Cerebral Cortex*, vol. 15(11), pp. 1676-1689.

Resnick, S.M., D.L. Pham, M.A. Kraut, A.B. Zonderman et C. Davatzikos (2003), « Longitudinal Magnetic Resonance Imaging Studies of Older Adults: A Shrinking Brain », *Journal of Neuroscience*, vol. 23(8), pp. 3295-3301.

Rosen, A.C., M.W. Prull, R. O'Hara, E.A. Race, J.E. Desmond, G.H. Glover, J.A. Yesavage et J.D.E. Gabrieli (2002), « Variable Effects of Aging on Frontal Lobe Contributions to Memory », *Neuroreport*, vol. 13, pp. 2425-2428.

Rossi, S., C. Miniussi, P. Pasqualetti, C. Babiloni, P.M. Rossini et S.F. Cappa (2004), « Age-related Functional Changes of Prefrontal Cortex in Long-term Memory: A Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Study », *Journal of Neuroscience*, vol. 24(36), pp. 7939-7944.

Roth, G. (2004), « Warum sind Lehren und Lernen so schwierig? », *Z.f.Päd.*, 50. Jg., vol. 4, pp. 496-506.

Rypma, B. et M. D'Esposito (2000), « Isolating the Neural Mechanisms of Age-related Changes in Human Working Memory », *Nature Neuroscience*, vol. 3(5), pp. 509-515.

Saczynski, J.S., S.L. Willis et K.W. Schaie (2002), « Strategy Use in Reasoning Training with Older Adults », *Aging Neuropsychology and Cognition*, vol. 9/1, pp. 48-60.

Salthouse, T.A. (1996), « The Processing-speed Theory of Adult Age Differences in Cognition », *Psychological Review*, vol. 103, pp. 403-428.

Schaie, K.W. (2005), « Developmental Influences on Adult Intelligence. The Seattle Longitudinal Study », University Press, Oxford.

Schuller, T., J. Preston, C. Hammond, A. Brassett-Grundy et J. Bynner (éd.) (2004), *The Benefits of Learning. The Impact of Education on Health, Family Life and Social Capital*, Routledge Farmer, Londres.

Shors, T.J., G. Miesegaes, A. Beylin, M. Zhao, T. Rydel et E. Gould (2001), « Neurogenesis in the Adult is Involved in the Formation of Trace Memories », *Nature*, vol. 410, pp. 372-376.

Siebert, H. (1998), *Konstruktivismus: Konsequenzen für Bildungsmanagement und Seminargestaltung*, Schneider, Frankfurt a.M.

Siebert, H. et G. Roth (2003), « Gespräch über Forschungskonzepte und Forschungsergebnisse der Gehirnforschung und Anregungen für die Bildungsarbeit », *Report 3,Literatur- und Forschungsreport Weiterbildung*, Gehirn und Lernen, pp. 14-19.

Singer, W. (2002), *Der Beobachter im Gehirn*, Suhrkamp, Frankfurt a.M.

Snowdon, D.A., S.J. Kemper, J.A. Mortimer, L.H. Greiner, D.R. Wekstein et W.R. Markesbery (1996), « Linguistic Ability in Early Life and Cognitive Function and Alzheimer's Disease in Late Life. Findings from the Nun Study », *Journal of the American Medical Association*, vol. 275, pp. 528-532.

Sowell, E.R., B.S. Peterson, P.M. Thompson, S.E. Welcome, A.L. Henkenius et A.W. Toga (2003), « Mapping Cortical Change across the Human Life Span », *Nature Neuroscience*, vol. 6(3), pp. 309-315.

Spitzer, M. (2000), « Geist, Gehirn & Nervenheilkunde. Grenzgänge zwischen Neurobiologie », *Psychopathologie und Gesellschaft*, Schattauer, New York.

Spitzer, M. (2002), *Lernen. Gehirnforschung und die Schule des Lebens*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Spitzer, M. (2004), *Selbstbestimmen. Gehirnforschung und die Frage: Was sollen wir tun?*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Stern, E. (2004), « Wie viel Hirn braucht die Schule? Chancen und Grenzen einer neuropsychologischen Lehr-Lern-Forschung », *Z.f.Päd*, 50.Jg., vol. 4, pp. 531-538.

Stern, E., R. Grabner, R. Schumacher, C. Neuper et H. Saalbach (2005), « Lehr-Lern-Forschung und Neurowissenschaften: Erwartungen, Befunde und Forschungsperspektiven », Bildungsreform Bd.13, BMBF, Berlin.

Sternberg, R.J. (1990), *Wisdom: Its Nature, Origin, and Development*, Cambridge University Press, New York.

Thomae, H. (1970), « Theory of Aging and Cognitive Theory of Personality », *Human Development 13*, pp. 1-16.

Tippelt, R. (1999) (éd.), *Handbuch Erwachsenenbildung/Weiterbildung*, Leske & Budrich, Opladen.

Tippelt, R. (2000), « Bildungsprozesse und Lernen im Erwachsenenalter. Soziale Integration und Partizipation durch lebenslanges Lernen », D. Benner et H.-E. Tenorth (éd.), *Bildungsprozesse und Erziehungsverhältnisse im 20. Jahrhundert, Z.f.Päd.*, vol. 42, Beiheft, Beltz, Weinheim, pp. 69-90.

Tippelt, R. (2002) (éd.), *Handbuch Bildungsforschung*, Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.

Tippelt, R. (2004), « Lernen ist für Pädagogen keine Blackbox: Basiselemente einer pädagogisch konzipierten Lerntheorie », *Grundlagen der Weiterbildung*, vol. 3/15, pp. 108-110.

Tippelt, R. et B. Schmidt (2005), « Was wissen wir über Lernen im Unterricht? », *Pädagogik*, vol. 3, pp. 6-11.

Walhovd, K.B., A.M. Fjell, I. Reinvang, A. Lundervold, A.M. Dale et D.E. Eilertsen (2005), « Effects of Age on Volumes of Cortex, White Matter and Subcortical Structures », *Neurobiology of Aging*, vol. 26(9), pp. 1261-1270.

Wechsler, D. (1939), *The Measurement and Appraisal of Adult Intelligence*, Williams & Wilkens, Baltimore.

Weinert, F.E. (2001), « Vergleichende Leistungsmessung in Schulen – eine umstrittene Selbstverständlichkeit », *Leistungsmessungen in Schulen*, Beltz, Weinheim, pp. 17-31.

Weinert, F.E. et H. Mandl (1997) (éd.), *Psychologie der Erwachsenenbildung*, Hogrefe, Göttingen.

Welzer, H. et H.J. Markowitsch (2001), « Umrisse einer interdisziplinären Gedächtnisforschung », *Psychologische Rundschau*, vol. 52(4), pp. 205-214.

White, R.W. (1959), « Motivation Reconsidered: The Concept of Competence », *Psychological Review*, vol. 66, pp. 297-333.

Williamson, A. (1997), « You Are Never too Old to Learn! Third-Age Perspectives on Lifelong Learning », *International Journal of Lifelong Education*, vol. 16/3, pp. 173-184.

Wilson, R.S., C.F. Mendes De Leon, L.L. Barnes, J.A. Schneider, J.L Bienias, D.A. Evans et autres (2002), « Participation in Cognitively Stimulating Activities and Risk of Incident Alzheimer Disease », *JAMA*, vol. 287(6), pp. 742-748.

Wrenn, K.A. et T.J. Maurer (2004), « Beliefs about Older Workers Learning and Development Behaviour in Relation to Beliefs about Malleability of Skills, Age-Related Decline, and Control », *Journal of Applied Social Psychology*, vol. 34/2, pp. 223-242.

ISBN 978-92-64-02914-9
Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage
© OCDE 2007

ANNEXE A

Les forums

Les forums de discussion « Teach the brain » (*www.ceri-forums.org/forums*) du CERI de l'OCDE ont grandement contribué à faire communiquer deux communautés très importantes : enseignants et scientifiques. Ils permettaient aux enseignants de poser des questions sur la façon dont le cerveau apprend, de se renseigner sur les moyens d'intégrer les avancées de la neuroscience dans leurs méthodes pédagogiques, de comprendre pourquoi et comment leurs pratiques et leurs intuitions fonctionnent, et de partager leur point de vue de praticiens. Des scientifiques leur répondaient et apportaient leurs compétences. Enfin, des experts et le « Brain Team » du CERI se tenaient prêts à dissiper les malentendus et à expliquer les termes utilisés.

En deux ans, le succès a été considérable : plus de 160 discussions ont été créées, entraînant plus de 2 000 réponses, et l'activité a sans cesse augmenté : de 300 visites par mois en 2005, on est passé à 600 par mois au premier semestre 2006.

Ces forums ont permis d'aborder les questions que se posent aujourd'hui les enseignants (des faiblesses en mathématiques peuvent-elles être dues à un problème cérébral ?), les idées fausses qu'ils peuvent avoir (un enfant atteint d'ADHD manque-t-il de motivation ?), et ont apporté aux éducateurs des éléments de réponse sur ce que la neuroscience peut apporter à l'éducation (comment tenir compte du fonctionnement cérébral dans une pratique pédagogique ?).

Vous trouverez ici une sélection d'échanges tirés de plusieurs discussions, de « émotions et apprentissage » à « Littératie et cerveau » en passant par « Dyscalculie » et « Neuroscience et éducation ». L'un des participants est en Californie, à Solana Beach, un autre au Royaume-Uni, dans une ferme à East York ; un autre encore en plein cœur des États-Unis, un autre en Australie ; certains viennent de pays qui n'appartiennent pas à l'OCDE, comme l'Inde ou le Nigeria. Vous croiserez des enseignants, des éducateurs, des neuroscientifiques, des experts de l'OCDE. Ils ont pour pseudonymes « segarama », « puppet-maker », « justme », « the foreign brain » ou « institutrice de CM1 ». Certains, sexagénaires, sont à la retraite ; toujours passionnés par l'enseignement et l'apprentissage, ils veulent se tenir au courant des découvertes neuroscientifiques et de leurs applications possibles.

Venez à leur rencontre, découvrez ce qu'ils ont à dire ; ils sont au carrefour de la neuroscience et de l'éducation, quelque part entre échange d'information et applications concrètes. C'est tous ensemble que nous pourrons avancer.

Les échanges qui suivent sont directement tirés des forums. Rien n'a été modifié – ni le fond, ni la forme (à part la traduction !) – afin de préserver l'authenticité des messages, et la personnalité des intervenants.

La dyslexie…

Chers tous,

Je voudrais savoir ce qui fait qu'un élève dyslexique n'arrive pas à entendre la différence entre deux sons. D'où viennent ses difficultés à percevoir les rimes, à segmenter les mots en sons, à les assembler ? Et qu'est-ce qui cause le déficit de traitement phonologique ? Une infection de l'oreille chez un bébé peut-elle entraîner une dyslexie ? Et une blessure ou un coup à la tête ? Faut-il une cause extérieure, ou bien y a-t-il des raisons internes ? ça fait longtemps que je m'intéresse aux causes des handicaps. J'aimerais que vous me parliez de l'origine des troubles du traitement phonologique qui gênent tant les dyslexiques.

justme

Bonjour justme,

Vous trouverez des informations à ce sujet sur le site *Cerveau et apprentissage* de l'OCDE à l'adresse : *www.oecd.org/document/51/0,2340,en_2649_14935397_35149043_1_1_1_1,00.html* (page en anglais). Je vous recommande également la lecture de *Overcoming Dyslexia*, de Sally Shaywitz (2003).
Bien à vous,

Christina Hinton
Experte, consultante pour le CERI de l'OCDE

Chers tous,

J'aimerais que vous développiez l'idée que la dyslexie n'est pas un état « particulier » qui empêche de lire correctement, mais simplement une incapacité à segmenter et associer les sons, indépendante de l'intelligence – tout comme le daltonisme. Cette façon de voir a récemment été défendue à la télévision britannique, mais je n'ai pas retenu le nom des invités.

Deborah

Chère Deborah,

Au sujet de cette émission de télé et de la position de M. Elliot. Tous les enfants atteints d'un « trouble de l'apprentissage » doivent d'abord être « étiquetés » en fonction de leur trouble avant qu'on les aide à y remédier. Pas d'étiquette, pas d'aide. Le problème, c'est que très peu d'enfants/d'adultes correspondent exactement aux étiquettes utilisées. Cela crée un autre problème : que se passe-t-il après l'étiquetage ? On détermine une stratégie de remédiation en fonction de l'étiquette. Ce qui ne tient pas compte de la grande variété de causes possibles quand un enfant a « du mal à apprendre à écrire », « du mal à apprendre à lire » ou « est dyslexique ». Elliot, lui, affirme que cette étiquette recouvre des choses très diverses. Il dit qu'il faut s'occuper, non de l'étiquette, mais de l'origine du trouble, et adopter ainsi une « approche individualisée ».

J'ai tendance à dire qu'il faut s'occuper, non de l'étiquette, mais d'apprendre au grand public comment fonctionne le cerveau.

Geoff.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Cher forum,

On considère aujourd'hui la dyslexie comme un problème. J'espère que bientôt ce sera considéré comme un autre mode de pensée, capable de déboucher sur des idées originales et sur des nouvelles façons de résoudre tel ou tel problème. Vue comme ça, la dyslexie peut être un atout… il suffit de la regarder différemment.

frulle

Les mathématiques…

Chers tous,

Je connais un enfant très intelligent, qui a d'excellentes notes dans toutes les matières sauf en maths. Ses parents disent qu'il travaille autant dans cette matière que dans les autres. Il vient d'avoir huit ans. Est-ce normal? Pensez-vous que ses faibles résultats en maths puissent être liés à un problème au niveau cérébral ?
Merci d'avance,

The foreign brain

Chers enseignants,

Ce week-end, j'ai lu sur ce site un excellent article à propos des troubles de l'apprentissage des mathématiques. Je ne peux malheureusement pas vous dire comment je suis tombée dessus : il y a trop de choses intéressantes ici, je passe des heures à lire différents textes et j'ai du mal à en retrouver un précis. En tout cas, je crois que c'est lié au sens des nombres. À l'origine, le problème vient de ce que l'enfant ne comprend pas ce que sont les nombres et ce qu'ils représentent. L'article explique que pour comprendre le nombre cinq, par exemple, un enfant doit reconnaître le symbole 5, le mot écrit cinq, et le concept de cinq. J'espère que vous pourrez retrouver l'article dont je parle, et que vous apporterez vos contributions ici. Je trouve cela très intéressant.

Cathy Trinh

L'enfant dont vous parlez est peut-être dyscalculique. La dyscalculie est l'équivalent de la dyslexie pour les maths, mais elle est bien moins connue que la dyslexie. Les définitions et les tests de diagnostic varient selon les pays. Même la terminologie peut changer : aux États-Unis, on parle de « handicap mathématique ». En Angleterre, on utilise un test mis au point par Brian Butterworth, le « Dyscalculia Screener ». En France, les orthophonistes se débrouillent tout seuls. Aux États-Unis, c'est le psychologue scolaire qui pose le diagnostic.

Cathy, l'article dont vous parlez est sans doute celui qui parle du symposium sur le logiciel de remédiation à la dyscalculie (dont le développement est en partie financé par l'OCDE); vous le trouverez vers le bas de la page « Cerveau et apprentissage ».

Pour en savoir plus sur la dyscalculie, vous pouvez consulter le site de Brian Butterworth : *www.mathematicalbrain.com*.

L'équipe de l'OCDE va bientôt mettre en ligne davantage d'informations sur la dyscalculie, alors revenez nous voir !

Anna Wilson

Sur les méthodes d'évaluation…

Bonjour Christina,

Merci de votre réponse.

À propos des implications possibles pour l'enseignement, je voudrais revenir à notre récent échange sur les méthodes d'évaluation.

Cela souligne les avantages de l'évaluation formative quand on veut dépasser l'évaluation élémentaire qui permet de déterminer si un élève est « bon » ou « mauvais » dans une matière, sans indiquer les points sur lesquels il a besoin d'aide.

L'évaluation formative s'intéresserait aux processus neuraux mis en œuvre pour apprendre quelque chose. Cela permettrait d'identifier le(s) processus neuraux qu'il faut aider à mettre en place. On retombe donc sur la question de savoir ce que les Enseignants doivent connaître des neurosciences appliquées à l'apprentissage ?

Geoff.

Cher Geoff,

Votre idée de lier directement neuroscience et évaluation donne à réfléchir. Verra-t-on un jour contrôles ou partiels s'accompagner d'un examen neuroscientifique, IRMf ou autre ?

À plus tard,

Christina Hinton
Experte, consultante pour le CERI de l'OCDE

Chère Christina,

C'est peut-être un sujet explosif ? ça pourrait être très utile, puisque ça permettrait d'identifier les « problèmes » très tôt et d'y remédier de façon ciblée, au lieu d'attendre des années de mauvaises notes pour réagir, alors que l'élève a déjà pris beaucoup de retard. Ça aurait des avantages indéniables, non ?

Geoff.

Sur les émotions et l'apprentissage…

Chers enseignants,

Pensez-vous qu'à l'école on puisse séparer émotions et processus cognitifs ?

Christina Hinton
Experte, consultante pour le CERI de l'OCDE

Chers tous,

Un mot suffit : non.

Dans un monde idéal, les profs se retrouveraient face à des élèves qui apprendraient tout ce qu'on leur enseigne dès qu'on le leur enseigne, et qui montreraient d'eux-mêmes qu'ils ont compris. C'est ça que beaucoup de gens attendent de l'école. Et pour eux, si les choses se passent différemment, c'est que le prof ou l'élève a un problème. Mais à mon avis, le seul vrai problème, c'est qu'on ne s'occupe pas assez des émotions.

Regardez le cas des maths. Les élèves de CM1 qui peuvent réciter « automatiquement » les tables de multiplications arrivent à résoudre des problèmes plus compliqués que les autres, en moins de temps. (Bien sûr, certains élèves ont besoin de temps pour réciter leurs

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

tables, mais sont très efficaces dans les problèmes plus complexes; mais les enseignants s'occupent de beaucoup d'élèves en même temps, et on a tendance à généraliser.) Il y a des années, je me suis rendu compte que travailler les tables en groupe était très nocif. Les bons élèves étaient ravis; les autres étaient malheureux. Quelques-uns appréciaient l'émulation, et travaillaient d'autant plus dur. La plupart réagissaient en s'auto-dénigrant et décidaient qu'ils étaient « nuls en maths ». Tous les ans, des parents me disent que leurs enfants détestent ces interrogations parce que – quelle qu'en soit la raison – ils n'arrivent pas à réfléchir assez vite. Ils en concluent donc que les maths n'ont pas grande importance, et qu'il ne faut pas insister. Ce à quoi je réponds qu'on va encore essayer quelques semaines, pour voir comment ça évolue. Et là, je demande à des parents de faire travailler les enfants individuellement. Quand les élèves se retrouvent seuls, et que personne n'est là pour les juger, ils font tous des progrès. Ils sont heureux, les parents aussi, et certains viennent même me remercier.

Je trouve très intéressantes les remarques faites ici au sujet de l'apprentissage global, des capacités motrices, de la physique, de la philo, et des bases biologiques. Pour vraiment comprendre chaque message, j'essaie d'imaginer la personne qui l'écrit, sa vie et son état d'esprit, pour comprendre ce qu'elle a en tête. Comprendre les gens sur le plan émotionnel aide à comprendre leur raisonnement et la façon dont ils l'expriment : c'est encore un exemple de ce qu'est vraiment « apprendre à lire ». Nous avons tous une « voix » quand nous écrivons, et quoi que nous écrivions. La voix dépend de la personnalité de celui qui écrit, donc de ses émotions.

Il ne me paraît donc pas possible de séparer émotions et processus cognitifs. Je pense même qu'il faut que l'apprentissage comporte une part de passion. Mais la concentration, l'adaptation, la gestion des émotions en somme, c'est tout à fait possible; c'est même une grande part du travail d'un enseignant. Tout dépend peut-être de ce que vous entendez par « séparer »?

Quelle est là-dessus la position de la neuroscience?

Une enseignante de CM1

Chère enseignante de CM1,

Merci beaucoup pour votre intervention.

Au niveau cérébral, les processus émotionnels et cognitifs ne sont pas distincts, tout simplement parce qu'émotion et cognition sont des concepts qui ne correspondent à rien dans la façon dont le cerveau fonctionne. Le cerveau consiste en groupes de neurones dotés de propriétés et de fonctions propres; c'est ce qu'on appelle la modularité. Ces groupes gèrent des fonctions très spécifiques, par exemple la perception spatiale ou la distinction des sons. Un stimulus déclenche un ensemble de réactions dans divers groupes de neurones, ce qui produit une sensation. Certains éléments de cette sensation peuvent être décrits comme « cognitifs » ou « émotifs », mais cette répartition ne renvoie à rien dans le cerveau. Je considère donc que les émotions de vos élèves lorsqu'ils font des maths ne peuvent pas être séparées des processus cognitifs qu'ils mettent en œuvre. Il me semble que c'est également votre opinion.

Bien à vous,

Christina Hinton
Experte, consultante pour le CERI de l'OCDE

La neuroscience de l'éducation…

Chers enseignants,

Voici les réflexions qu'un expert de l'éducation et un célèbre neuroscientifique ont partagées avec nous lors de la réunion du réseau « Apprentissage tout au long de la vie » (tenue à Tokyo en janvier 2005). Nous aimerions que vous nous fassiez part de vos réactions.

« Pour construire un pont, les ingénieurs ne se reposent pas sur la physique. Et ils n'attendent pas de la physique qu'elle leur explique comment s'y prendre. Non, ils *étudient* la physique, et ils en *adaptent* les principes aux décisions concrètes qu'ils doivent prendre, y compris les éléments régissant les déplacement des véhicules qui emprunteront un jour ce pont. ».

(Michael Posner, neuroscientifique)

« Si nous utilisons tous tellement de métaphores dans le domaine de l'éducation et du cerveau, c'est qu'il n'existe pas vraiment de domaine de référence. On est obligé d'aborder ce concept comme une relation à quelque chose que les groupes sociaux pourront reconnaître. ».

Frank Coffield

Chers tous,

Posner a parfaitement raison, mais je vous recommande l'ouvrage *Why Buildings Fall Down* de Matthys Levy et Mario Salvadori. Aucun progrès n'est possible sans échec, et personne n'irait prétendre que les architectes ne devraient jamais prendre de risque. Il faut accepter de ne pas tout savoir, et avancer quand même : on n'a pas le choix.

Alors, qui va oser avancer ?

Karl

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

ANNEXE B

Technologies d'imagerie cérébrale

Les techniques de la recherche neuroscientifique sont variées et peuvent englober des processus dits invasifs (comme la neurochirurgie par exemple). Cependant, les outils les plus connus et les plus utilisés aujourd'hui relèvent de la technologie non invasive de l'imagerie cérébrale. Ces outils peuvent être séparés en deux catégories : ceux qui fournissent, sur l'activité cérébrale, une information spatiale de haute résolution et ceux qui fournissent une information temporelle de haute résolution. Parmi les outils fournissant une information spatiale de haute résolution, les plus connus sont la tomographie par émission de positons (TEP) et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Les techniques TEP détectent l'activité cérébrale au moyen de radio-isotopes en relevant les modifications dans la consommation d'oxygène et de glucose, et les altérations du flux sanguin cérébral. L'IRMf, par l'utilisation de fréquences radio et d'aimants, identifie les changements dans la concentration d'hémoglobine désoxygénée (voir encadré A). Ces deux techniques demandent que le sujet conserve une immobilité parfaite pour que l'on parvienne à une imagerie exacte.

Il faut en retenir que le signal qui est mesuré (le changement en oxygène) est une fonction naturelle du corps; on n'a pas besoin d'injecter quoi que ce soit. La procédure est donc non invasive, au contraire d'autres méthodes d'imagerie cérébrale comme la tomographie par émission de positons, qui nécessite l'injection d'un produit radioactif. L'IRMf, sans danger, permet donc d'étudier le cerveau d'un enfant, et peut être utilisée de façon répétée sur un même individu : il est maintenant possible d'étudier les effets dans le temps d'un apprentissage, d'interventions, etc. Il faut également garder à l'esprit que le signal – dont on considère qu'il représente l'activité neurale – est une mesure INDIRECTE. Cette limite est importante : aujourd'hui, toute mesure directe de l'activité neurale n'est possible que sur des animaux.

La TEP et l'IRMf fournissant une résolution spatiale au millimètre près mais une résolution temporelle d'une précision de plusieurs secondes seulement, ces techniques sont utiles à la mesure des changements de l'activité cérébrale durant des phases d'activité cognitive relativement prolongées. Une autre technique, la stimulation magnétique transcrânienne (SMT), est utilisée pour créer une disruption temporaire (quelques secondes) des fonctions cérébrales afin d'aider à localiser l'activité dans une région circonscrite du cerveau. Néanmoins, des processus tels que celui du calcul mathématique ou de la lecture impliquent plusieurs autres processus se produisant en l'espace de quelques centaines de millisecondes. Pour cette raison, la TEP et l'IRMf sont capables de localiser des régions du cerveau impliquées dans la lecture ou l'activité mathématique, mais ne peuvent mettre en lumière les interactions dynamiques entre processus mentaux durant ces activités.

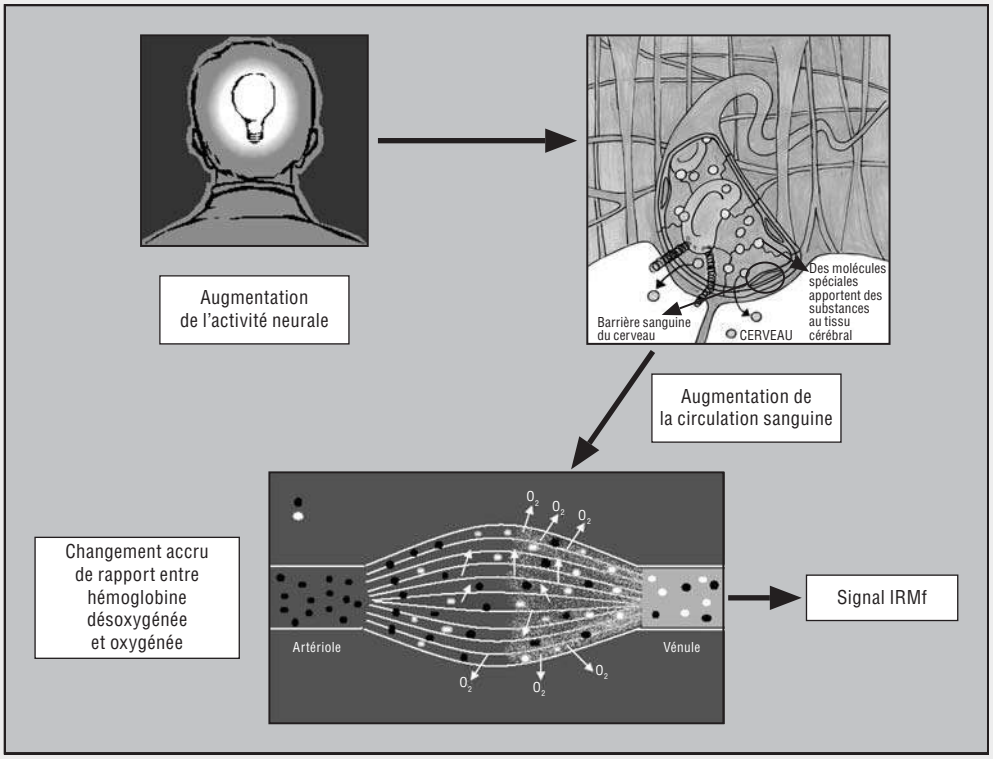
Encadré A. **Qu'est ce que l'IRMf ?**

L'IRMf, qui permet d'observer le fonctionnement du cerveau, est une variante de l'IRM classique utilisée dans les hôpitaux pour examiner les tissus mous : genoux, dos ou cerveaux (alors que les rayons X, eux, révèlent les parties dures : os et calcifications). C'est donc à l'IRM qu'apparaît le cerveau, entièrement composé de tissus mous. L'IRMf a globalement les mêmes avantages que l'IRM et les mêmes inconvénients : 1) le patient doit rester parfaitement immobile; 2) il est très difficile pour les claustrophobes de supporter l'étroitesse du tube; 3) c'est très bruyant. L'IRM classique fonctionne parce que les différents tissus ont des propriétés magnétiques légèrement différentes, et les aimants les font réagir de manières légèrement différentes; les ordinateurs permettent ensuite de traduire cela en images. L'IRMf repose sur le fait que l'oxygène, et l'hémoglobine qui le transporte, ont des propriétés magnétiques et réagissent au champ magnétique. Cela permet de mesurer la fonction cérébrale, puisque les neurones les plus actifs utilisent plus d'oxygène que les autres : leur signal magnétique est différent.

Le fonctionnement en bref :

Un sujet pense à quelque chose, ou réalise une tâche cognitive ou perceptuelle; l'activité neurale augmente donc dans une (ou des) région(s) précise(s) du cerveau, ce qui entraîne une augmentation de l'afflux sanguin dans ces mêmes régions, et une augmentation de la quantité d'oxygène qui y est apportée (ou, plus précisément, une modification des quantités respectives d'hémoglobine oxygénée et désoxygénée). C'est cette variation de la quantité d'oxygène qui est mesurée par l'IRMf (voir le graphique A).

Graphique A. **Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle**



Source : Elize Temple, image de Cassandra Davis.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Un autre ensemble d'outils fournit une résolution temporelle à l'échelle de la milliseconde, mais la résolution spatiale est plus grossière, se limitant à quelques centimètres. Ces techniques mesurent les champs électrique ou magnétique à la surface du cuir chevelu durant l'activité mentale. Parmi elles figurent l'électroencéphalographie (EEG), les potentiels évoqués (ERP pour Event-Related Potentials) et la magnéto-encéphalographie (MEG). L'EEG et les ERP utilisent des électrodes placées en des endroits bien précis du crâne. Vu leur facilité d'utilisation et leur relative souplesse, ces techniques sont souvent utilisées avec succès chez les enfants. La MEG utilise des appareils fonctionnant à la température de l'hélium liquide, les SQUIDs (pour Super-Conducting Quantum Interference Devices). Grâce à ces outils, on peut effectuer des mesures exactes à l'échelle de quelques millisecondes dans les changements de l'activité cérébrale durant la réalisation de tâches cognitives.

Parmi les nouvelles méthodes d'imagerie non invasive des fonctions cérébrales figure la topographie optique (OT pour Optical Topography, voir encadré B), développée à partir de la spectroscopie en proche infrarouge (NIRS pour Near-Infrared Spectroscopy). Contrairement aux méthodologies conventionnelles, elle peut être utilisée pour des études de comportement, les fibres optiques flexibles permettant au sujet de conserver sa liberté de mouvement, de sorte qu'on peut construire un système aussi léger que compact. Cette méthode peut être appliquée à l'enfant comme à l'adulte. L'observation du développement lors du premier âge sur une durée d'un mois fournira des informations sur l'architecture du système des processus neuraux dans le cerveau. La topographie optique est susceptible d'avoir des répercussions très importantes sur l'éducation et l'apprentissage[1].

Pour procéder à des recherches efficaces dans le domaine de la neuroscience cognitive, il est nécessaire de combiner ces techniques afin de fournir des informations sur la localisation spatiale et les changements temporels de l'activité cérébrale associée à l'apprentissage. En opérant la liaison avec les processus de l'apprentissage, il est important pour le neuroscientifique de disposer d'opérations et d'analyses cognitives fines afin de tirer au maximum parti des outils d'imagerie cérébrale. Parmi les disciplines associées à l'apprentissage, celles qui fournissent le plus d'analyses fines sont les études en science cognitive et en psychologie cognitive et, à ce jour, les études sur les processus visuels, la mémoire, le langage, la lecture, les mathématiques, et la résolution de problèmes.

Parmi les autres options de recherche offertes aux neuroscientifiques, on trouve l'examen du cerveau lors d'une autopsie (pour mesurer la densité synaptique, par exemple) et, dans quelques rares cas, le travail auprès de certaines populations médicales, tels que les épileptiques par exemple (pour identifier les processus cérébraux auprès de personnes victimes de lésions ou de dommages cérébraux dus à une maladie ou à un traumatisme). Certains neuroscientifiques étudient les enfants souffrant du syndrome d'alcoolisme fœtal ou du syndrome du chromosome X fragile, d'autres la dégénérescence cognitive caractéristique du déclenchement de la maladie d'Alzheimer ou de la dépression sénile. D'autres encore étudient le cerveau des primates ou d'autres animaux, tels que les rats et les souris, afin de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau humain. Par le passé, avant l'avènement des techniques d'imagerie cérébrale, il était difficile de collecter des informations d'essence neuroscientifique au sein de la partie saine de la population.

1. Koizumi, H. et autres (1999), « Higher-order brain function analysis by trans-cranial dynamic near-infrared spectroscopy imaging », *Journal Biomed*. Opt., vol. 4.

Encadré B. **La topographie optique en proche infrarouge utilisée en sciences de l'apprentissage et en recherche sur le cerveau**

La topographie optique en proche infrarouge (NIR-OT) est une nouvelle méthode non invasive d'étude des fonctions cérébrales supérieures. Elle permet d'observer l'activation cérébrale chez plusieurs sujets en même temps en conditions réelles (à domicile ou en classe, par exemple). Elle permet d'évaluer l'activité cérébrale d'un individu ou d'un groupe d'individus lors d'études diachroniques par échantillonnage.

Depuis le début des années 90, on utilise d'autres méthodes (imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ou IRMf, et magnéto-encéphalographie ou MEG); mais celles-ci ont des inconvénients : le sujet doit être immobile à l'intérieur d'une machine durant toute l'opération de mesure. Ce n'est pas très gênant pour la neurologie traditionnelle, qui s'occupe surtout de malades; mais depuis qu'on s'intéresse aux fonctions cérébrales normales en conditions réelles, c'est handicapant. La NIR-OT permet d'observer plusieurs sujets sans aucune restriction, ce qui est essentiel lorsqu'on s'intéresse à l'interaction élèves-professeurs.

La NIR-OT utilise une lumière proche de l'infrarouge, transmise par une fibre optique et dirigée sur le crâne; une partie des ondes lumineuses pénètre sur environ 30 millimètres de profondeur (chez les adultes), est réfléchie par le cortex et ressort par la peau du crâne. Cette lumière est alors détectée par une autre fibre optique située à environ 30 millimètres du point d'entrée, et analysée. L'irradiation équivaut à celle de la lumière du soleil, l'hiver et par temps couvert. Il s'agit d'une machine semi-conductrice mobile, qui à l'avenir pourra se présenter sous la forme d'un circuit intégré petit et maniable, ce qui agrandirait beaucoup l'environnement de mesure.

Plusieurs études préliminaires dans le domaine des sciences de l'apprentissage et de la recherche sur le cerveau ont déjà été menées, dont des études sur le développement de bébés en bonne santé, des études sur le langage, et sur la mémoire de travail. La NIR-OT a également été employée pour étudier les modifications des fonctions cérébrales lorsqu'on cuisine et lorsqu'on conduit.

Source : Hideaki Koizumi, Fellow, Hitachi, Ltd.

Une autre limitation tient au fait qu'il n'existe pas un seul ensemble bien compris de tâches d'apprentissage ayant jamais été appliqué à des populations humaines normales sur toute la durée d'une vie. Un travail considérable a été accompli en ce qui concerne l'apprentissage lors de la petite enfance, beaucoup moins pour ce qui est de l'apprentissage pendant l'adolescence et encore moins à l'âge adulte. Sans schéma de référence du développement cognitif normal, il est difficile de comprendre une éventuelle pathologie de l'apprentissage.

Nous devons comprendre à la fois le pouvoir et les limites des technologies d'imagerie cérébrale et la nécessité de protocoles cognitifs rigoureux si nous voulons commencer à comprendre comment la neuroscience cognitive peut guider l'éducation dans la formation de programmes d'études fondés sur les mécanismes cérébraux. De récentes découvertes commencent à montrer que l'éducation finira par se situer au carrefour de la neuroscience cognitive et de la psychologie cognitive tout en intégrant une analyse pédagogique sophistiquée et bien définie. À l'avenir, l'éducation sera transdisciplinaire, à la croisée de plusieurs domaines différents qui se fondront pour produire une nouvelle génération de chercheurs et de spécialistes de l'éducation aptes à poser des questions pertinentes et signifiantes au regard de l'éducation.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Les méthodes de recherche actuelles en matière de neuroscience cognitive limitent nécessairement les types de problèmes étudiés. Par exemple, des questions comme : « Comment les individus apprennent-ils à reconnaître les mots écrits ? » sont plus ouvertes au traitement que « Comment les individus reconnaissent-ils les thèmes dans un texte ? », parce que l'objet de la première question mène à des études où les stimuli et les réponses sont plus faciles à contrôler et à contraster avec une autre tâche. En conséquence, le processus devient compréhensible en référence à des modèles cognitifs connus. L'objet de la seconde question implique trop de facteurs impossibles à séparer avec succès durant la phase expérimentale. Pour cette raison, les tâches éducatives valorisées par la société resteront toujours plus complexes que celles qui conviendraient sans doute à la neuroscience cognitive.

Les chercheurs soulignent aussi la nécessité méthodologique de tests d'apprentissage non seulement aussitôt après une intervention éducative (ce qui est typique des habitudes actuelles), mais aussi après un certain laps de temps, en particulier dans le cas d'une comparaison relative à l'âge. Dans le cadre de telles études diachroniques, les projets de recherche quittent l'enceinte du laboratoire pour s'intéresser au vivant en situation réelle, ce qui induit une incertitude quant aux délais de disponibilité des résultats pour une interprétation dans un but éducatif.

Lorsque l'on tente de comprendre et d'analyser des données scientifiques, il est important de conserver un esprit critique pour juger des affirmations relatives à la neuroscience cognitive et à ses conséquences en matière éducative. Il faut considérer les points suivants :

- Quelle est l'étude originelle et quel est son but principal ?
- L'étude est-elle isolée ou fait-elle partie d'une série ?
- L'étude est-elle censée avoir des conséquences pour l'éducation ?
- Quelle est la population utilisée[2] ?

On a récemment souligné[3] l'importance pour les progrès de la science du développement d'une communauté informée et critique (qui parviendrait, au bout d'un certain temps, à un consensus sur les découvertes scientifiques ou prétendues telles). Le développement d'une telle communauté (composée d'éducateurs, de psychologues cognitifs, de neuroscientifiques cognitifs, de politiques, etc.) autour de la science de l'apprentissage en émergence est d'une importance cruciale. Si l'on souhaite que cette communauté se développe, il est nécessaire de dégager un jugement critique approprié en matière d'affirmations relatives à l'apprentissage et à l'éducation et ayant trait au cerveau. Intégrés à cette communauté, les décideurs politiques en matière éducative définiront avec plus de succès des programmes d'études fondés sur une connaissance des mécanismes cérébraux s'ils reconnaissent les points suivants :

a) la popularité d'une affirmation neuroscientifique n'implique pas nécessairement sa validité ;

b) la méthodologie et la technologie de la neuroscience cognitive sont encore en chantier ;

2. Que l'on ait utilisé des primates humains ou non humains, il est de la plus haute importance de questionner le caractère représentatif de l'échantillon et de demander quelle est la population concernée par les résultats.
3. Dans un rapport de l'US National Research Council sur « La démarche scientifique dans l'éducation » (*www.nap.edu*).

c) l'apprentissage n'est ni entièrement conscient ni entièrement volontaire ;

d) le cerveau subit des changements et un développement naturels tout au long de la vie ;

e) une grande partie des recherches en matière de neuroscience a été consacrée à la compréhension ou à l'exploration des maladies et des pathologies du cerveau ;

f) pour être satisfaisante, une science de l'apprentissage doit considérer des facteurs émotionnels et sociaux en plus des facteurs cognitifs ;

g) bien que la science de l'apprentissage et l'éducation « fondée sur le cerveau » n'en soient qu'à leurs débuts, d'importants progrès sont déjà acquis.

Il existe quantité de données de nature psychologique (en majorité extraites d'études bien conçues en psychologie cognitive) à partir desquelles tirer des leçons pour l'apprentissage et l'enseignement. Les données provenant de la neuroscience cognitive peuvent aider à affiner certaines hypothèses, à lever l'ambiguïté de certaines affirmations et à suggérer des directions pour la recherche. En d'autres termes, l'une des contributions majeures de la neuroscience cognitive à la science émergente de l'apprentissage serait de doter cette discipline nouvelle d'un scepticisme scientifique, qui serait appliqué aux affirmations péremptoires et aux plaidoyers concernant l'amélioration de l'enseignement et de l'apprentissage, plaidoyers dont les fondements ne sont pas toujours vérifiés. Mais le scepticisme qui reste de mise face à certaines affirmations relatives aux fondements neuroscientifiques de l'apprentissage ne doit pas servir de terreau au cynisme lorsqu'il est question des bénéfices potentiels que l'éducation peut retirer des neurosciences.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Glossaire

Acalculie. Voir Dyscalculie.

Acides gras. Le corps humain est capable de produire tous les acides gras dont le cerveau a besoin, sauf deux (l'acide linoléique et l'acide alpha-linolénique), qui doivent être apportés par l'alimentation (les végétaux et l'huile de poisson, respectivement). Ils sont donc appelés acides gras essentiels. (Voir aussi Acides gras oméga et AGHI.)

Acides gras oméga. Acides gras polyinsaturés que le corps humain est incapable de synthétiser.

ADHD. *Attention Deficit Hyperactivity Disorder* : syndrome d'hyperactivité et de déficit de l'attention. Syndrome lié à des problèmes de l'apprentissage et du comportement. Caractérisé par la difficulté à maintenir l'attention, un comportement impulsif (exemple : parler sans y être invité) et souvent l'hyperactivité.

ADN. Acide désoxyribonucléique. L'ADN est un long polymère de nucléotides (un polynucléotide) qui code la séquence d'acides aminés grâce à des protéines, en utilisant le code génétique.

AGHI. Acides gras hautement insaturés.

Aire de Broca. Zone située dans le lobe frontal de l'hémisphère gauche, impliquée dans la production langagière.

Aire de Wernicke. Région cérébrale impliquée dans la compréhension du langage et la production du discours.

Alzheimer (Maladie d'~). Maladie dégénérative progressive du cerveau liée au vieillissement, caractérisée par une atrophie cérébrale diffuse, des lésions distinctives appelées plaques séniles et des amas de fibres anormales (dégénérescence neurofibrillaire). Les processus cognitifs de la mémoire et de l'attention sont affectés.

Amygdale. Partie du cerveau impliquée dans les émotions et la mémoire. Chacun des deux hémisphères contient une amygdale (« en forme d'amande »), localisée dans les profondeurs du cerveau, près de la surface interne de chacun des lobes temporaux.

Anhédonie. L'un des principaux symptômes des dépressions avec troubles de l'humeur. Les patients souffrants d'anhédonie sont incapables de tirer du plaisir des activités normalement agréables (manger, faire de l'exercice, rapports sociaux et sexuels).

Aphasie. Trouble de la compréhension ou de la production langagière.

Apolipoprotéine E ou « apoE ». Étudiée depuis plusieurs années en raison de son implication dans les maladies cardio-vasculaires. On a récemment découvert que l'un des allèles (facteurs génétiques) du gène de l'apoE (e4) était un facteur de risque associé à la maladie d'Alzheimer.

Apprentissage (Science de l'~). Terme tentant de désigner et de définir le type de recherche qui devient possible lorsque la neuroscience cognitive et les autres disciplines concernées rejoignent la recherche et la pratique dans le domaine de l'éducation.

Apprentissage attendant de recevoir de l'expérience. Apprentissage lié à une propriété d'un système neural fonctionnel dans lequel le développement du système a évolué jusqu'à dépendre de façon critique d'entrées environnementales stables plus ou moins semblables pour tous les membres d'une espèce (par exemple : la stimulation des deux yeux chez le nouveau-né durant le développement des colonnes de dominance oculaire). On pense que cette propriété est surtout opératoire au début de la vie.

Apprentissage dépendant de l'expérience. Apprentissage lié à une propriété d'un système neural fonctionnel dans lequel des variations de l'expérience entraînent des variations dans les fonctions. On pense que cette propriété est opératoire pendant toute la vie.

Apprentissage implicite. Voir Souvenir implicite.

Attention. Processus cognitif permettant de se concentrer délibérément sur une tâche en ignorant le reste. Les études par imagerie ont montré les réseaux distincts qui gèrent les diverses composantes de l'attention : maintenir l'acuité mentale, gérer l'information sensorielle et arbitrer entre plusieurs pensées ou plusieurs sentiments.

Autisme/Troubles du spectre autistique. Spectre d'anomalies du développement neurologique, caractérisées par des difficultés pour communiquer et créer des relations sociales, par des comportements répétitifs et par des difficultés d'apprentissage.

Axone. Long filament fibreux partant du corps cellulaire du neurone, et par lequel celui-ci transmet l'information aux cellules cibles.

Cartes cognitives. Représentations mentales d'objets et de lieux par rapport à leur environnement.

Cellules gliales. Voir Gliales (cellules).

Cerebrum ou télencéphale. Terme désignant l'ensemble composé des hémisphères cérébraux et d'autres structures cérébrales plus petites. Le cerebrum est composé des régions suivantes : système limbique, cortex cérébral, ganglions de la base et bulbe olfactif.

Cerveau droit. Terme de profane basé sur la conception erronée selon laquelle les processus mentaux supérieurs sont strictement divisés et se produisent indépendamment dans les deux parties du cerveau. Découle probablement d'exagérations de découvertes spécifiques sur certaines spécialisations de l'hémisphère droit dans des domaines limités.

Cerveau gauche. Terme de profane basé sur la conception erronée selon laquelle les processus mentaux supérieurs sont strictement divisés et se produisent indépendamment dans les deux parties du cerveau. Découle probablement d'exagérations de découvertes spécifiques sur certaines spécialisations de l'hémisphère gauche, tels que les systèmes neuraux contrôlant la parole.

Cerveau dit « reptilien ». Plus ancienne (en termes d'évolution) partie du cerveau humain.

Cervelet. Partie du cerveau située derrière et en dessous des hémisphères principaux, impliquée dans la régulation des mouvements.

Circadien (rythme)/Circadienne (horloge). Cycle comportemental ou physiologique, d'une durée d'environ 24 heures.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Cochlée. Organe en forme d'escargot, contenant un fluide et situé dans l'oreille interne, et qui transforme les mouvements perçus en informations neurologiques, produisant ainsi des perceptions auditives.

Cognition. Ensemble des opérations mentales incluant tous les aspects de la perception, de la pensée, de l'apprentissage et de la mémoire.

Cognition sociale. Étude de la façon dont les gens traitent l'information sociale (codage, stockage, récupération et utilisation.)

Cognitive (Neuroscience ~). Étude et développement de la recherche sur le cerveau et les processus mentaux, ayant pour but l'investigation des fondements psychologiques, analytiques et neuroscientifiques de la cognition.

Cognitive (Science ~). Étude des processus mentaux. Science interdisciplinaire s'inspirant de plusieurs domaines dont la neuroscience, la psychologie, la philosophie, l'informatique, l'intelligence artificielle et la linguistique. Le but de la science cognitive est de développer des modèles permettant d'expliquer la cognition humaine – la perception, la pensée et l'apprentissage.

Compétence. En parlant des apprenants, capacité mentale nécessaire à réaliser une tâche donnée.

Conditionnement classique. Apprentissage lors duquel un stimulus qui produit naturellement une réaction donnée (le stimulus inconditionnel) est systématiquement associé à un stimulus neutre (le stimulus conditionnel). À force, le stimulus conditionnel déclenche une réaction similaire à celle obtenue par l'exposition au stimulus inconditionnel.

Conditionnement de la peur. Il s'agit d'une forme de conditionnement classique (type d'apprentissage par association, expérimenté sur des animaux, dont Ivan Pavlov a été l'un des pionniers dans les années 20), mettant en jeu l'association d'un stimulus neutre (une lumière par exemple) appelé « stimulus conditionnel » et d'un stimulus négatif (douleur d'intensité moyenne par exemple) appelé « stimulus inconditionnel » jusqu'à ce que l'animal manifeste de la peur en réaction au stimulus neutre (non associé au stimulus douloureux) : c'est la réaction conditionnelle. Le conditionnement de la peur semble dépendre de l'amygdale. Empêcher le fonctionnement de l'amygdale peut empêcher de ressentir et d'exprimer la peur.

Consolidation de la mémoire. Changements physiques et psychologiques qui se produisent quand le cerveau organise et restructure l'information afin de l'intégrer à la mémoire à long terme.

Constructivisme. Théorie de l'apprentissage selon laquelle l'individu construit activement le sens à partir de ses expériences.

Corps calleux. Large ruban de fibres nerveuses qui relie les deux hémisphères cérébraux.

Cortex auditif. Partie du cerveau responsable du traitement de l'information auditive (les sons).

Cortex (cérébral). Couche supérieure des hémisphères cérébraux.

Cortex cingulaire antérieur. Partie frontale du cortex cingulaire. Il est impliqué dans de nombreuses fonctions autonomes, dont la régulation du rythme cardiaque et de la pression sanguine. Son rôle est crucial pour les fonctions cognitives : attente de récompense, prise de décision, empathie et émotions.

Cortex moteur. Régions du cortex cérébral impliquées dans la planification, le contrôle et l'exécution des fonctions motrices volontaires.

Cortex moteur primaire. Collabore avec les aires prémotrices pour planifier et exécuter les mouvements.

Cortex occipito-temporal ou aire de Brodman. Dans le cerveau humain, partie du cortex temporal.

Cortex préfrontal. Région située à l'avant du cortex frontal, impliquée dans la planification et dans d'autres fonctions cognitives supérieures.

Cortex visuel. Situé dans le lobe occipital, il est impliqué dans la détection des stimuli visuels.

Cortex visuel primaire. Région du cortex occipital où la plus grande partie de l'information visuelle est reçue en premier lieu.

Cortisol. Hormone fabriquée par le cortex surrénal. Chez les humains, c'est avant l'aube qu'elle est produite en plus grande quantité; elle prépare le corps aux activités de la journée.

Décodage. Processus élémentaire de l'apprentissage des systèmes d'écriture alphabétiques (par exemple : l'anglais, l'espagnol, l'allemand ou l'italien), dans lequel on déchiffre les mots inconnus en associant leurs lettres aux sons correspondants.

Démence sénile. État de détérioration des processus mentaux, caractérisé par un net déclin du niveau intellectuel du sujet et souvent par une apathie émotionnelle marquée. La maladie d'Alzheimer est une forme de démence sénile.

Dendrite. Ramification issue du corps d'un neurone, et qui reçoit l'information transmise par d'autres neurones.

Densité synaptique. Voir Synaptique (Densité ~).

Dépression. Diminution de la vitalité ou de l'activité fonctionnelle; état d'une personne dont la vitalité physique ou mentale est en dessous de la normale. La dépression sénile atteint les seniors, et se caractérise souvent par l'agitation et l'hypochondrie. On ne sait pas encore vraiment si cette dépression chez les personnes âgées est différente ou non de celle qui peut toucher les sujets plus jeunes.

Développement phylogénétique. Processus par lequel l'évolution favorise les comportements génétiques qui assurent le mieux la survie de l'espèce.

Dopamine. Neurotransmetteur appartenant aux catécholamines, dont l'effet varie selon l'endroit où il agit. Chez les personnes atteintes de la maladie de Parkinson, ce sont les neurones produisant de la dopamine de la substantia nigra qui sont détruits. Il semble que la dopamine régule les réactions émotionnelles, soit impliquée dans la schizophrénie et soit affectée par la consommation de cocaïne.

Dyscalculie ou acalculie. Désordre se manifestant par des difficultés dans la réalisation de calculs arithmétiques simples en dépit d'une instruction normale, d'une intelligence adéquate et de conditions socioculturelles non défavorables.

Dyslexie. Désordre se manifestant par des difficultés dans l'apprentissage de la lecture en dépit d'une instruction normale, d'une intelligence adéquate et de conditions socioculturelles non défavorables.

Dyspraxie. Troubles de la coordination motrice lors d'enchaînements complexes.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

ECG. Électrocardiogramme. Mesure de la tension électrique dans le cœur, exprimée par une ligne continue.

EEG. Électroencéphalogramme. Mesure de l'activité électrique du cerveau au moyen d'électrodes. L'EEG s'obtient à partir de capteurs placés à divers endroits du cuir chevelu, sensibles à l'activité globale de groupes de neurones situés dans une région donnée du cerveau.

Élagage synaptique. Voir Synaptique (Élagage ~).

Émotions. Il n'existe pas de définition universellement acceptée. D'un point de vue neurobiologique, l'émotion est un état mental agréable ou désagréable dont le siège principal est le système limbique.

Empan mnésique. Quantité d'information qui est parfaitement retenue dans un test de mémoire immédiate.

Endorphine. Neurotransmetteur produit dans le cerveau, et dont les effets sur les cellules et le comportement sont similaires à ceux de la morphine.

Entraînement cognitif. Méthodes d'enseignement et d'apprentissage visant à remédier aux déficits cognitifs.

Épigénétique. Expression des gènes affectée par les stimuli environnementaux.

Épilepsie. Désordre nerveux chronique chez l'être humain, entraînant des convulsions d'une gravité variable accompagnées de pertes de conscience; l'épilepsie implique des altérations de la conscience et des mouvements, dont l'origine est soit une déficience congénitale, soit une lésion cérébrale produite par une tumeur, une blessure, des agents toxiques ou des troubles glandulaires.

ERP. *Event-Related Potentials :* voir Potentiels évoqués

Esprit. Rôle et fonction du cerveau, comprenant l'intellect et la conscience.

Étude de cohorte. Type d'étude longitudinale (ou « diachronique ») utilisée en médecine et en sciences sociales. Une cohorte est un groupe de gens qui partagent une caractéristique ou une expérience commune.

Étude diachronique. Voir Étude longitudinale.

Étude longitudinale. Étude portant sur un même groupe d'individus observés à des âges différents.

Étude par échantillonnage. Type d'étude descriptive qui mesure les caractéristiques d'une population à un moment précis.

Excitation. Modification de l'état électrique d'un neurone, associée à une augmentation des probabilités des potentiels d'action.

Fluide cérébro-spinal. Liquide contenu dans les ventricules cérébraux et au centre de la moelle épinière.

Gammatomographie. Imagerie fonctionnelle utilisant la tomographie d'émission à photon unique.

Ganglions de la base. Groupes de neurones comprenant le noyau caudé, le putamen, le globus pallidus et la substantia nigra; situés au cœur du cerveau, ils jouent un rôle important dans le mouvement. La mort de cellules de la substantia nigra contribue à l'apparition des symptômes de la maladie de Parkinson.

Gène. Unité de l'hérédité chez les organismes vivants. Les gènes influencent le développement physique et le comportement de l'organisme. Voir aussi Génétique.

Génétique. Science des gènes, de l'hérédité et de l'évolution des organismes. La **génétique classique** regroupe les techniques et méthodes datant d'avant l'avènement de la biologie moléculaire. La **génétique moléculaire** se fonde sur la génétique classique pour étudier la structure et la fonction des gènes au niveau moléculaire. La **génétique comportementale** étudie l'influence des variations génétiques sur le comportement animal, ainsi que les causes et les conséquences des maladies humaines.

Glande pinéale. Organe endocrinien du cerveau. Chez certains animaux, elle semble avoir un rôle d'horloge biologique et être influencée par la lumière.

Glande pituitaire. Organe endocrinien étroitement lié à l'hypothalamus. Chez les humains, elle se compose de deux lobes et sécrète des hormones qui régulent l'activité d'autres organes endocriniens du corps.

Gliales (cellules). Cellules spécialisées qui alimentent et entretiennent les neurones.

Globus pallidus. Structure sous-corticale.

Graphèmes. Plus petit élément écrit d'un alphabet; lettre.

Gyrus. Circonvolutions du cortex, dont chacune a reçu une appellation distinctive : gyrus frontal médian, gyrus frontal supérieur, gyrus frontal inférieur, gyrus frontal intérieur gauche, gyrus médian postérieur, gyrus post-central, gyrus supermaginal, gyrus angulaire, gyrus angulaire gauche, gyrus fusiforme gauche, gyrus cingulaire.

Gyrus angulaire. Zone du cortex dans le lobe pariétal, associée au traitement de la structure sonore du langage et à la lecture.

Gyrus fusiforme. Région du cortex courant le long de la surface ventrale (inférieure) des lobes occipitaux temporaux, associée aux processus visuels. On déduit de l'activité fonctionnelle de cette zone qu'elle est spécialisée dans la reconnaissance visuelle des visages et dans la forme visuelle des mots.

Hémisphères cérébraux. Chacune des deux parties du cerveau : le gauche et le droit.

Hippocampe. Élément important du système limbique, impliqué dans l'apprentissage, la mémoire et les émotions.

Hormones. Molécules produites par les glandes endocrines et qui régulent l'activité des cellules cibles. Elles jouent un rôle dans le développement sexuel, le métabolisme du calcium (osseux), la croissance, et bien d'autres éléments.

Hypothalamus. Structure cérébrale complexe, composée de nombreux centres aux fonctions variées, dont la régulation de l'activité des organes internes, le suivi des informations transmises par le système nerveux autonome, et le contrôle de la glande pituitaire.

Image mentale ou visualisation. Les images mentales (comprenant des informations visuelles et spatiales) sont créées par le cerveau à partir des souvenirs, de l'imagination ou d'un mélange des deux. On a émis l'hypothèse que les zones du cerveau responsables de la perception étaient également impliquées dans ce processus.

Imagerie par tenseur de diffusion. (DTI pour *Diffusion Tensor Imaging*). Technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM) qui permet de mesurer la diffusion de l'eau dans les tissus. On peut ainsi observer *in vivo* la diffusion des molécules, et donc l'organisation moléculaire, dans les tissus.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Imagerie fonctionnelle. Ensemble de techniques de mesure dont le but est d'obtenir des informations quantitatives relatives aux fonctions physiologiques.

Inhibition. En parlant des neurones, message synaptique qui empêche l'activation de la cellule cible.

Insomnie. Incapacité à rester endormi pendant une durée raisonnable.

Intelligence. Propriété de l'esprit sans définition scientifique. Peut être de type fluide ou cristallisé. (Voir également Intelligences multiples et QI.)

Intelligence artificielle (IA). Domaine de l'informatique qui cherche à mettre au point des machines qui se comportent de façon « intelligente ».

Intelligence émotionnelle. Parfois appelée quotient émotionnel (QE). Les individus dotés d'intelligence émotionnelle sont capables de considérer autrui avec compassion et empathie, ont des capacités sociales développées et utilisent leur conscience émotionnelle pour déterminer leurs actes et leur comportement. Ce terme a été forgé en 1990.

Intelligences multiples. Terme créé pour mieux expliquer et décrire les diverses façons, toutes également importantes, de percevoir et penser l'environnement.

Ions. Atomes électriquement chargés.

IRM. Imagerie par résonance magnétique. Technique non invasive utilisée pour créer des images des structures contenues dans un cerveau humain vivant, par l'emploi combiné d'un champ magnétique fort et de pulsations radio.

IRMf. Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Utilisation d'un scanner IRM pour observer indirectement l'activité neurale grâce à des variations dans la chimie du sang (telle que celle du taux d'oxygène) et pour étudier des augmentations de l'activité dans les zones du cerveau associées à diverses formes de stimuli et de tâches mentales.

Limbique (Système ~). Également appelé « cerveau émotionnel ». Ce système bordant le thalamus et l'hypothalamus est constitué de certaines des structures les plus profondes du cerveau – dont l'amygdale, l'hippocampe, le septum et les ganglions de la base – qui contribuent à la régulation émotionnelle, à la mémoire et à certains aspects du mouvement.

Lobe. Terme désignant des zones du cerveau différenciées par leurs fonctions (lobe occipital, temporal, pariétal et frontal).

Lobe frontal. L'une des quatre grandes parties de chaque hémisphère du cortex cérébral. Il est impliqué dans le contrôle du mouvement et la coordination des fonctions des autres aires corticales. On pense qu'il joue un rôle essentiel dans la planification et les processus cognitifs supérieurs.

Lobe occipital. Région postérieure du cortex cérébral recevant l'information visuelle.

Lobe pariétal. L'une des quatre parties du cortex cérébral. Il est impliqué dans le traitement sensoriel, l'attention et le langage, ainsi que dans le traitement de l'information spatiale, la représentation corporelle, etc. Il est divisé en lobule pariétal supérieur et lobule pariétal inférieur. Il se compose du précunéus, du gyrus postcentral, du gyrus supramaginal et du gyrus angulaire.

Lobe temporal. L'une des quatre grandes parties de chaque hémisphère du cortex cérébral. Il est impliqué dans la perception auditive, la parole et les perceptions visuelles complexes.

Maladie de Parkinson. Maladie dégénérative du système nerveux central, qui affecte le contrôle musculaire, et donc le mouvement, la parole et les attitudes physiques. (Voir aussi Neurodégénératives.)

Maniaco-dépression ou trouble bipolaire. Troubles de l'humeur qui passe de crises maniaques (une forme d'euphorie) à des épisodes dépressifs aigus. Il n'y a pas de cause évidente, mais la maniaco-dépression est associée à des modifications internes des neurotransmetteurs cérébraux. Ces troubles peuvent être déclenchés par le stress, un événement de la vie quotidienne, un événement traumatisant ou, plus rarement, un traumatisme physique (blessure à la tête par exemple).

MEG ou Magnéto-encéphalographie. Technique d'imagerie fonctionnelle non invasive du cerveau, sensible aux changements rapides de l'activité cérébrale. Les enregistreurs (« SQUIDs » pour *Superconducting Quantum Interference Devices*) placés près de la tête sont sensibles aux faibles fluctuations magnétiques associées à l'activité neurale dans le cortex. Les réactions aux événements peuvent être mesurées à la milliseconde près, avec une bonne résolution spatiale pour les générateurs auxquels cette technique est sensible.

Mélatonine. Produite à partir de la sérotonine, la mélatonine est diffusée dans le sang par la glande pinéale. Elle joue sur les modifications physiologiques dues au temps et aux cycles de luminosité.

Mémoire. La **mémoire de travail** et la **mémoire à court terme** désignent les structures et les processus utilisés pour stocker momentanément l'information et la manipuler. La **mémoire à long terme** conserve les souvenirs et leur signification. Un souvenir à court terme peut être intégré dans la mémoire à long terme grâce à la répétition et à l'association significative.

Mémoire à court terme. Étape de la mémoire, capable de retenir une quantité limitée d'informations pour une durée allant de plusieurs secondes à quelques minutes.

Mémoire à long terme. La dernière étape de la mémoire. L'information peut être stockée pour une durée qui varie de quelques heures à la vie entière.

Messagers secondaires. Substances récemment identifiées, qui déclenchent la communication entre différentes parties d'un neurone. Ils jouent probablement un rôle dans la fabrication et la libération des neurotransmetteurs, dans les mouvements intracellulaires, dans le métabolisme glucidique, voire dans les processus de croissance et de développement. Leurs effets directs sur le matériel génétique des cellules entraînent peut-être des modifications comportementales durables, et pourraient concerner la mémoire.

Métabolisme. Somme de toutes les modifications physiques et chimiques qui se produisent dans un organisme, et de toutes les transformations énergétiques qui se produisent dans des cellules vivantes.

Métacognition. Pensée sur la pensée.

Microgénétique. Méthode d'observation des changements qui se produisent lors du développement. La méthode microgénétique insiste sur le fait que le changement est continuel, et se produit sur bien des points en plus des étapes majeures. Observer ces changements peut aider les chercheurs à comprendre comment les enfants apprennent.

Mnémotechnique. Technique qui améliore les performances mnésiques.

Morphologie. En linguistique, étude de la structure des mots.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Motivation. Peut être définie comme ce qui fait agir. Les états de motivation sont ceux où l'organisme est prêt à agir physiquement et mentalement d'une manière concentrée ; ils sont caractérisés par un niveau d'excitation élevé. La motivation est donc étroitement liée aux émotions, qui permettent au cerveau de prendre des décisions. La **motivation intrinsèque** pousse les gens à pratiquer une activité pour elle-même, sans motifs extérieurs, alors que la **motivation extrinsèque** est due à des facteurs extérieurs comme l'attente d'une récompense.

Myéline. Substance graisseuse compacte qui entoure et isole les axones de certains neurones.

Myélinisation. Processus par lequel les nerfs sont recouverts d'une substance graisseuse protectrice. La gaine (myéline) entourant les fibres nerveuses se comporte comme un câble dans un système électrique, ce qui empêche la perte des messages transmis par les fibres nerveuses.

Mythe du « Tout se joue avant trois ans » ou « Mythe des premières années ». Selon cette affirmation, seules les trois premières années comptent pour ce qui est de l'évolution de l'activité cérébrale, le cerveau étant insensible au changement après cette période. On peut considérer qu'il s'agit là d'une forme extrême du concept de « période critique ».

Nerf auditif. Faisceau de fibres nerveuses entre la cochlée et le cerveau, contenant deux parties : le nerf cochléaire qui transmet l'information sonore, et le nerf vestibulaire qui transmet l'information liée à l'équilibre.

Neurobiologie. Étude des cellules du système nerveux.

Neurodégénératives (maladies). Désordres du cerveau et du système nerveux conduisant à des dysfonctionnements, puis à une dégénérescence du cerveau, telles que la maladie d'Alzheimer, la maladie de Parkinson et les autres affections généralement associées au vieillissement.

Neurogénèse. Naissance dans le cerveau de cellules nouvelles, parmi lesquelles des neurones.

Neuromythe. Concept erroné découlant d'une erreur de compréhension, de lecture ou de citation d'un fait neuroscientifique établi.

Neurone. Cellule nerveuse spécialisée dans l'intégration et la transmission de l'information. Un neurone comporte de longs filaments fibreux, les axones, et de plus petites excroissances, les dendrites. Le neurone est l'élément constitutif fondamental du système nerveux.

Neurone moteur. Neurone qui transporte l'information du système nerveux central jusqu'au muscle.

Neurones miroir. Neurones qui sont activés lorsque quelqu'un réalise une action, mais aussi lorsqu'il voit quelqu'un d'autre réaliser cette même action. Les neurones miroir « reflètent » les comportements, et réagissent comme si l'observateur réalisait lui-même l'action.

Neurotransmetteur. Substance chimique libérée par les neurones au niveau des synapses, et qui transmet l'information jusqu'aux récepteurs.

NIRS *Near InfraRed Spectroscopy :* voir Spectroscopie en proche infrarouge.

Noyau accumbens. Groupe de neurones situé à la jonction de la tête du noyau caudé et de la partie antérieure du putamen, sur le côté du septum pellucidum. Le noyau

accumbens semble jouer un rôle important dans les systèmes de récompense, de plaisir et d'addiction.

Noyau caudé. Noyau du télencéphale situé à l'intérieur des ganglions de la base. Important pour les systèmes cérébraux de mémorisation et d'apprentissage.

Ocytocine. Parfois appelée hormone de l'amour, l'ocytocine est impliquée dans la formation de liens sociaux, et peut-être dans l'établissement du sentiment de confiance entre des individus.

Ontogenèse. Histoire du développement d'un individu.

Organe endocrinien. Organe qui secrète une hormone et la diffuse dans le sang afin de réguler l'activité cellulaire de certains autres organes.

Orthographe. Ensemble de règles déterminant la façon correcte d'écrire une langue.

OT. Voir Topographie optique.

Période critique. Concept désignant certaines périodes au début de la vie, durant lesquelles la capacité du cerveau à se modifier en fonction de l'expérience est substantiellement meilleure qu'à l'âge adulte. Il vaut mieux parler de « période sensible », pendant laquelle un processus biologique a tendance à se dérouler le mieux. (Voir Période sensible.)

Période sensible. Laps de temps durant lequel un événement biologique est susceptible de se produire dans les meilleures conditions. Les scientifiques ont établi l'existence de périodes sensibles pour certains types de stimuli sensoriels (tels la vision et les sons associés au langage) et pour certaines expériences émotionnelles et cognitives (liens affectifs, exposition au langage). Cependant, il existe de nombreuses compétences mentales, telles que l'acquisition de vocabulaire et la capacité à distinguer les couleurs, dont le développement ne semble pas dépendre de périodes sensibles.

Périsylviennes (Régions ~). Zones du cortex adjacentes à la fissure sylvienne (fissure majeure de la surface latérale du cerveau située le long du lobe temporal).

PET. Tomographie par émission de positons. Ensemble de techniques utilisant des nucléotides émetteurs de positons pour créer une image de l'activité cérébrale, souvent par le biais de la circulation sanguine ou de l'activité métabolique. La TEP produit des images colorées des substances chimiques opérant dans le cerveau.

Phonèmes. Unités fondamentales du discours oral, qui constituent les mots.

Plasticité ou plasticité cérébrale. Phénomène par lequel le cerveau est capable de changer et d'apprendre. Voire aussi Apprentissage dépendant de l'expérience et Apprentissage attendant de recevoir de l'expérience.

Potentialisation à long terme (LTP). Augmentation de la réactivité d'un neurone en conséquence d'une stimulation passée.

Potentiel d'action. Se produit lorsqu'un neurone est activé, et inverse de manière temporaire l'état électrique de sa membrane interne (de négatif à positif). Cette charge électrique gagne le terminal du neurone *via* l'axone, et déclenche la libération d'un neurotransmetteur excitateur ou inhibiteur.

Potentiels évoqués ou « ERP » (*Event-Related Potentials*). Mesure de l'activité électrique dans le cerveau en réponse aux stimuli sensoriels, grâce à des électrodes placés sur le crâne (ou, plus rarement, à l'intérieur), et qui administrent un stimulus de façon répétée. On enregistre des signaux électriques au moyen d'un EEG. Les données ainsi

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

obtenues sont ensuite synchronisées avec la présentation répétée au sujet d'un stimulus donné, afin d'observer le cerveau en action. L'activation cérébrale qui en résulte peut être ainsi mise en corrélation avec le stimulus.

Précunéus. Structure cérébrale située au-dessus du cunéus, dans le lobe pariétal.

QI. Nombre censé traduire l'intelligence relative d'une personne, obtenu à l'origine en divisant son âge mental par son âge réel et en multipliant par 100.

Qualia. Sensations subjectives. Dans *Phantoms in the Brain*, Ramachandran en parle ainsi : « Comment le flux d'électrons et de courants électriques dans ces grumeaux de gelée que sont mes neurones peut-il générer ce monde de sensations subjectives – rouge, chaleur, froid, douleur ? Quelle magie transforme la matière en sensations, en sentiments impalpables ? »

Régulation émotionnelle. Capacité de réguler et de contrôler ses émotions (maîtriser sa colère par exemple).

Réseaux cognitifs. Réseaux cérébraux impliqués dans des processus comme la mémoire, l'attention, la perception, l'action, la résolution de problème et la visualisation d'images mentales. Ce terme est également utilisé pour les réseaux artificiels (exemple : l'intelligence artificielle).

Rythme circadien/Horloge circadienne. Voir Circadien (rythme).

Schizophrénie. Maladie mentale caractérisée par des troubles de la perception ou de l'expression de la réalité, et/ou par des troubles sociaux importants.

Science cognitive Voir Cognitive (Science ~).

Science de l'apprentissage Voir Apprentissage (Science de l'~).

Sérotonine. Neurotransmetteur monoamine contribuant entre autres à la régulation thermique, à la perception sensorielle et à l'endormissement. Les neurones utilisant la sérotonine comme transmetteur se trouvent dans le cerveau et dans les intestins. Un certain nombre d'antidépresseurs agissent sur la sérotonine cérébrale.

Signaux électrochimiques. Signaux par lesquels les neurones communiquent entre eux.

Sillon ou sulcus. Sillon à la surface du cerveau (opposé à gyrus).

SMT ou Stimulation magnétique trans-crânienne. Procédure durant laquelle l'activité électrique du cerveau est influencée par les pulsations d'un champ magnétique. La SMT a été récemment employée pour étudier certains aspects des processus corticaux, notamment les fonctions sensorielles et cognitives.

Sommeil paradoxal. Stade du sommeil caractérisé par des mouvements oculaires rapides, durant lequel l'activité des neurones est très proche de celle observée à l'état de veille.

Souvenir/apprentissage explicite. Souvenir pouvant être évoqué par un acte conscient (remémoration) et pouvant être verbalisé, par contraste avec un souvenir implicite ou procédural, moins explicite sur le plan verbal.

Souvenir/apprentissage implicite. Souvenir ne pouvant être évoqué par un acte conscient, mais activé dans le cadre d'une compétence ou d'un acte donné et traduisant l'apprentissage d'une procédure ou d'une structure, très certainement difficile à verbaliser de façon explicite ou à définir de façon consciente (par exemple : un souvenir permettant

d'accomplir plus vite la deuxième fois que la première une action comme celle de lacer ses souliers).

Spectroscopie en proche infrarouge ou NIRS (*Near InfraRed Spectroscopy*). Méthode d'imagerie non invasive permettant de mesurer la concentration d'hémoglobine désoxygénée dans le cerveau au moyen de l'absorption des fréquences proches de l'infrarouge. (La lumière dont la longueur d'onde est comprise entre 700 et 900 nm peut partiellement pénétrer les tissus humains.)

Stimulus. Événement de l'environnement que les récepteurs sensoriels sont capables de percevoir.

Stress. Réactions physiques et mentales à toute expérience, réelle ou imaginaire, et à tout changement. Un stress excessif ou persistant peut conduire à des comportements dépressifs.

Striatum. L'une des parties subcorticales du télencéphale, surtout connue pour son rôle dans la planification et la modulation des mouvements, mais également impliquée dans de nombreux autres processus cognitifs faisant appel aux fonctions exécutives.

Substance blanche. Parties du cerveau composées surtout d'axones myélinisés connectant entre elles les zones de « substance grise ».

Substance grise. Parties du cerveau composées surtout des corps cellulaires des neurones ainsi que des dendrites.

Synapse. Espace séparant deux neurones, par lequel un neurone transmet de l'information à un autre neurone (alors appelé « cellule cible » ou « neurone post-synaptique »).

Synapses excitatrices. Synapses dans lesquelles les neurotransmetteurs diminuent la différence de potentiel entre les membranes des neurones.

Synaptique (Densité). Désigne le nombre de synapses associées à un neurone. Un nombre élevé traduit probablement une meilleure capacité de représentation et d'adaptation.

Synaptique (Élagage ~). Processus du développement cérébral par lequel les synapses (connexions entre neurones) inutilisées sont éliminées. C'est l'expérience qui détermine quelles synapses seront éliminées ou préservées.

Synaptogénèse. Formation d'une synapse.

Système immunitaire. Ensemble de cellules, d'organes et de tissus qui protègent le corps des infections.

Système nerveux parasympathique. Division du système nerveux autonome, impliqué dans la conservation de l'énergie et des ressources du corps pendant les périodes de repos.

Système nerveux périphérique. Division du système nerveux comprenant tous les nerfs qui n'appartiennent ni au cerveau ni à la moelle épinière.

Système nerveux sympathique. Division du système nerveux autonome qui mobilise l'énergie et les ressources du corps pendant les périodes d'activité, de stress et d'excitation.

Tâche de Stroop. Test psychologique d'évaluation de la vitalité et de la flexibilité mentale. Si le nom d'une couleur est imprimé dans une couleur différente (par exemple le mot « vert » écrit en bleu), il faut plus de temps au sujet pour identifier la couleur de l'encre ; les réponses sont alors plus lentes, et plus souvent fausses.

COMPRENDRE LE CERVEAU : NAISSANCE D'UNE SCIENCE DE L'APPRENTISSAGE – ISBN 978-92-64-02914-9 – © OCDE 2007

Terminal (d'un axone). Structure spécialisée située à l'extrémité des axones, d'où sont libérés les neurotransmetteurs afin de communiquer avec les neurones cibles.

Thalamus. Structure constituée de deux masses ovoïdes de tissu nerveux (chacune de la taille d'une noix), située au centre du cerveau. C'est par là que passent toutes les informations sensorielles qui parviennent au cerveau. Le thalamus ne relaie que les informations utiles, et ignore la masse de celles qui ne servent à rien.

Théorie de l'interférence. Une théorie de l'oubli qui veut que les autres souvenirs perturbent la rétention du souvenir cible.

Tomographie assistée par ordinateur. D'abord appelée tomographie axiale. Méthode d'imagerie médicale qui génère une image en 3 dimensions de l'intérieur d'un objet grâce à de nombreuses images en 2 dimensions prises aux rayons X autour d'un axe de rotation fixe.

Topographie optique ou OT (*Optical Topography*). Méthode d'imagerie trans-crânienne non invasive permettant d'observer les fonctions cérébrales élevées. Cette méthode, fondée sur la spectroscopie en proche infrarouge (NIRS), n'est pas obérée par le mouvement, et il est possible de tester un sujet dans des conditions naturelles.

Traitement de l'information. Analyse de la cognition humaine, *via* une série d'étapes, qui permet de traiter les informations abstraites.

Transdisciplinarité. Terme employé pour expliquer le concept par lequel des disciplines complètement différentes, fusionnant l'une avec l'autre, donnent naissance à une discipline nouvelle dotée de sa propre structure conceptuelle, qui permet de faire reculer les frontières des sciences et des disciplines ayant présidé à sa formation.

Tronc cérébral (« brainstem »). Principale voie de communication entre le cerveau d'une part et la moelle épinière et les nerfs périphériques d'autre part. Il contrôle, entre autres, la respiration et le rythme cardiaque.

Ventricule. L'un des quatre espaces assez vastes, pleins de fluide cérébro-spinal. Trois sont situés dans le cerveau, et un dans le tronc cérébral. Les ventricules latéraux (les deux plus grands) sont placés de chaque côté de celui-ci, un dans chaque hémisphère.

Autres ouvrages disponibles dans la collection CERI

L'école face aux attentes du public : faits et enjeux
164 pages • janvier 2007 • ISBN : 978-92-64-02842-0

Repenser l'enseignement : des scénarios pour agir
222 pages • juillet 2006 • : 978-92-64-02365-8

Personnaliser l'enseignement
144 pages • février 2006 • ISBN : 978-92-64-03661-X

La cyberformation dans l'enseignement supérieur – *État des lieux*
336 pages • février 2006 • ISBN : 978-92-64-00922-1

Élèves présentant des déficiences, des difficultés et des désavantages sociaux – *Statistiques et indicateurs*
162 pages • novembre 2005 • ISBN : 978-92-64-00982-5

Enseignement supérieur – *Internationalisation et commerce*
360 pages • septembre 2005 • ISBN : 978-92-64-01505-1

L'évaluation formative – *Pour un meilleur apprentissage dans les classes secondaires*
306 pages • février 2005 • ISBN : 978-92-64-00740-7

Qualité et reconnaissance des diplômes de l'enseignement supérieur : un défi international
240 pages • octobre 2004 • ISBN : 978-92-64-00669-9

www.oecdbookshop.org

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(96 2007 01 2 P) ISBN 978-92-64-02914-9 – n° 55382 2007

Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage

Cet ouvrage jette une lumière nouvelle sur l'apprentissage. Il dresse un panorama des connaissances actuelles et des découvertes dans le domaine des sciences cognitives et de la recherche sur le cerveau. Il montre ce que les dernières techniques d'imagerie cérébrale et autres avancées en neurosciences révèlent sur le développement du cerveau. Il examine notamment son fonctionnement à différentes étapes de la vie, depuis la naissance jusqu'à la vieillesse, ainsi que son rôle dans l'acquisition de compétences comme la lecture et le calcul. On trouvera également dans ce livre des analyses scientifiques sur les conséquences de dysfonctionnements du cerveau en cas d'affections telles que la dyslexie ou la maladie d'Alzheimer.

Cet ouvrage est une lecture essentielle pour tous ceux que la question de l'éducation intéresse, qu'il s'agisse de parents, d'enseignants, d'apprenants ou de responsables politiques. Ce livre pourra confirmer et éclairer ce qu'ils savent déjà d'expérience, mais il ménage également des surprises. L'un des objectifs de *Comprendre le cerveau* est d'encourager le dialogue entre les éducateurs et les chercheurs en neurosciences. Il s'agit de voir ce que chacun peut apporter à l'étude du processus d'apprentissage. Un effort international et transdisciplinaire contribuera de manière décisive au traitement des problèmes récurrents dans le domaine de l'éducation.

Publications du CERI

Giving Knowledge for Free: The Emergence of Open Educational Resources (2007 – disponible en anglais seulement)

Evidence in Education: Linking Research and Policy (2007 – disponible en anglais seulement)

Comprendre l'impact social de l'éducation (2007)

L'école face aux attentes du public : faits et enjeux (2006)

Repenser l'enseignement : des scénarios pour agir (2006)

Personnaliser l'enseignement (2006)

Le texte complet de cet ouvrage est disponible en ligne aux adresses suivantes :
www.sourceocde.org/enseignement/9789264029149
www.sourceocde.org/questionssociales/9789264029149

Les utilisateurs ayant accès à tous les ouvrages en ligne de l'OCDE peuvent également y accéder via :
www.sourceocde.org/9789264029149

SourceOCDE est une bibliothèque en ligne qui a reçu plusieurs récompenses. Elle contient les livres, périodiques et bases de données statistiques de l'OCDE. Pour plus d'informations sur ce service ou pour obtenir un accès temporaire gratuit, veuillez contacter votre bibliothécaire ou **SourceOECD@oecd.org**.

EDP SCIENCES www.edpsciences.com

éditions OCDE
www.oecd.org/editions

ISBN 978-2-7598-0028-5

ISBN 978-92-64-02914-9
96 2007 01 2 P