

Chapitre 5

Perspective développementale et biologique de l'apprentissage

Christina Hinton et Kurt W. Fischer
Harvard Graduate School of Education

Christina Hinton et Kurt Fischer analysent l'influence des interactions de la génétique et de l'expérience sur le développement cérébral et l'empreinte physique que les expériences d'apprentissage laissent sur la structure du cerveau. Ils mettent ensuite en lumière les interactions du tandem cognition/émotion. Ce chapitre fait le point sur les recherches consacrées au cerveau et aux mécanismes cérébraux d'acquisition des compétences scolaires fondamentales, notamment le langage, la lecture, l'écriture et les mathématiques, et analyse leur développement atypique. Alors que le cerveau est biologiquement programmé pour l'acquisition du langage, la capacité de lecture et d'écriture se construit au fil du temps et s'accompagne de toute une série de modifications neuronales. Cette capacité varie en outre en fonction de la langue. De même, la construction des circuits neuronaux impliqués dans l'acquisition des compétences mathématiques est dictée par les méthodes pédagogiques mises en œuvre. La recherche neuroscientifique corrobore les principales conclusions des études consacrées à l'apprentissage, notamment sur l'importance des caractéristiques individuelles et la nature essentiellement sociale de l'apprentissage humain. Cela signifie que les environnements d'apprentissage doivent intégrer une multitude de moyens de représentation, d'évaluation et d'engagement personnel.

Introduction

Comment l'inné et l'acquis interagissent-ils pour guider le développement cérébral? Comment le cerveau traduit-il les expériences d'apprentissage en signaux neurologiques? Pourquoi les enfants et les adolescents ont-ils souvent des difficultés à réguler leurs émotions? Pourquoi les enfants semblent-ils maîtriser l'accent dans une langue étrangère pratiquement sans effort? Comment le cerveau prend-il en charge la lecture? Le cerveau de l'enfant est-il prêt à apprendre les mathématiques dès l'école primaire? Quelle est la base neurologique de l'empathie et quel est son rôle dans l'apprentissage? Le nouveau champ de recherches sur l'esprit, le cerveau et l'éducation commence à apporter des réponses à toutes ces questions. Les progrès de la technologie, notamment dans le domaine de l'imagerie cérébrale, et les récentes recherches en sciences cognitives ont permis d'établir une cartographie des processus d'apprentissage et ont apporté une contribution majeure à une meilleure compréhension des mécanismes impliqués (Hinton, Miyamoto, et della-Chiesa, 2008; Fischer *et al.*, 2007; OCDE, 2007).

Ce chapitre fait un tour d'horizon des principes dégagés par les recherches en neurosciences et envisage leurs implications pour l'éducation. Il explique l'influence des interactions entre la génétique et l'expérience sur le développement cérébral, l'empreinte laissée par les expériences d'apprentissage sur la structure physique du cerveau et le fonctionnement en tandem de la cognition et des émotions. Il passe ensuite en revue les recherches récentes consacrées à l'esprit, au cerveau et à l'éducation et étudie les mécanismes cérébraux d'acquisition des compétences scolaires fondamentales, notamment le langage, la littératie et les mathématiques. Il examine enfin le rôle essentiel des interactions sociales et du contexte culturel dans les mécanismes cérébraux intervenant dans l'apprentissage et les implications pour la conception des environnements d'apprentissage.

Recherche sur l'esprit, le cerveau et l'éducation

Le champ de la recherche consacré à l'esprit, au cerveau et à l'éducation, également appelé « neurosciences de l'éducation », couvre de multiples disciplines, notamment les neurosciences, les sciences cognitives et l'éducation (Fischer *et al.*, 2007; OCDE, 2007). La recherche pédagogique a permis de constituer une immense base de connaissances que les recherches en neurosciences de l'éducation viennent compléter. Les chercheurs en éducation établissent souvent un lien entre les politiques et pratiques pédagogiques et les acquis de l'apprentissage. Pour leur part, les chercheurs en neurosciences font apparaître les principaux mécanismes causaux sous-jacents à ces relations. Ainsi, la recherche en éducation a démontré que les politiques et les pratiques pédagogiques qui préconisent de reporter l'acquisition d'une deuxième langue

au-delà de l'adolescence engendrent souvent des difficultés importantes dans le traitement de la grammaire et des sons (Fledge et Fletcher, 1992). La neuroscience propose une explication causale à ce phénomène et démontre que la maturité cérébrale a un impact sur l'apprentissage. Le jeune enfant apprend plus facilement en parlant avec les autres dans la langue qu'il est en train d'apprendre. Arrivé à l'adolescence ou à l'âge adulte, il a surtout besoin qu'on lui enseigne les règles (grammaire, sons, discussion)* (Neville et Bruer, 2001). Le nouveau champ de recherche en neurosciences de l'éducation établit une passerelle entre les différentes disciplines et met en lumière les raisons des résultats différenciés des politiques et pratiques éducatives.

Les recherches transdisciplinaires soulèvent de nouvelles difficultés, mais elles offrent aussi de nouvelles opportunités (Della Chiesa, Christoph et Hinton, 2009). La biologie, les sciences cognitives et l'éducation ont des cultures anciennes, solidement enracinées, avec une terminologie et des méthodes qui leur sont propres, ce qui complique la collaboration entre experts issus d'horizons différents. Il n'existe pas de consensus, ne serait-ce que sur les termes de base tels « apprentissage », ni d'harmonisation des outils méthodologiques de mesure. Les chercheurs qui travaillent dans les laboratoires sont déconnectés des politiques éducatives, de la culture scolaire et de la diversité des élèves. De ce fait, les résultats de leurs recherches n'offrent souvent qu'un intérêt limité pour la pratique (OCDE, 2007).

Pour leur part, les éducateurs (dans ce chapitre, ce terme couvre tous les adultes chargés de l'éducation des enfants et des adolescents) n'entrevoient pas toujours clairement les implications des recherches pour leurs pratiques (Goswami, 2006; Pickering et Howard-Jones, 2007). Ils sont en outre enclins à accorder une plus grande crédibilité aux idées exprimées dans un langage neuroscientifique, illustrées par une multitude d'images du cerveau. Certaines organisations politiques ou commerciales n'hésitent d'ailleurs pas à promouvoir leurs idées sur l'apprentissage soi-disant « neuromimétique », sans qu'aucune preuve scientifique solide ne vienne étayer leurs allégations (McCabe et Castel, 2008). À défaut de disposer des connaissances nécessaires en biologie et en sciences cognitives, les responsables des politiques éducatives et les praticiens, sont parfois incapables de distinguer les « neuromythes » de la réalité neuroscientifique (OCDE, 2007).

Nous devons donc faire preuve d'une certaine prudence dans notre analyse des implications des neurosciences sur la pratique éducative (Bruer, 1997). Les chercheurs, les responsables politiques et les praticiens doivent collaborer pour orienter les recherches dans la bonne direction, mais aussi pour aider les responsables politiques et les praticiens à comprendre les implications de la recherche

* Il est certes plus facile d'apprendre la grammaire lorsqu'on est enfant, mais on peut encore l'apprendre à l'âge adulte. En outre, les adultes ont plus de facilités pour apprendre certains aspects d'une langue (Snow et Hoefnagel-Hohle, 1978).

pour l'éducation. Pour continuer de progresser, il convient donc de créer une infrastructure susceptible d'encourager ce type de collaboration (Hinton et Fischer, 2008 ; Fischer, 2009 ; Shonkoff et Phillips, 2000). Le développement des recherches sur l'esprit, le cerveau et l'éducation peut apporter une contribution majeure à l'élaboration de politiques et de pratiques éducatives efficaces.

À l'interface de l'inné et de l'acquis

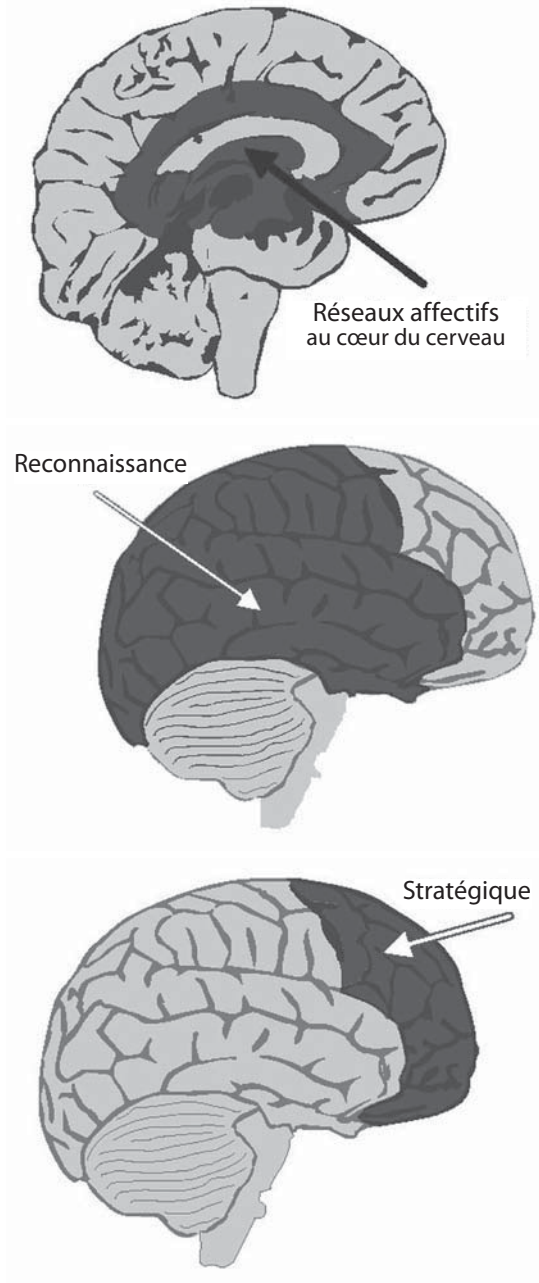
Comment expliquer que certains élèves soient doués en algèbre alors que d'autres bataillent pour y arriver ? Comment un jeune élève devient-il un musicien de talent ? Pourquoi certains élèves font-ils des efforts et persévèrent face à l'adversité ? Pourquoi certains enfants timides deviennent-ils des adultes extravertis ? La réponse à toutes ces questions n'est pas simple. Le développement implique une interaction complexe entre inné et acquis, la génétique et l'expérience étant indissociables (Hinton, Miyamoto, et della-Chiesa, 2008). Par exemple, une prédisposition génétique à la timidité peut être compensée par des relations sociales dans une culture grégaire. De même, une prédisposition génétique à développer une oreille absolue peut se transformer en un talent de cantatrice grâce aux encouragements d'une mère, aux conseils d'un professeur ou à la passion d'un enfant pour le chant. Tout au long de la vie, la génétique et l'expérience interagissent et influencent le développement.

La génétique forme le plan de l'organisation cérébrale de base. De même que l'architecte fournit un avant-projet de plan d'une maison à construire, la génétique programme la connectivité des réseaux neuronaux en vue d'un développement ultérieur. Ces profils de connectivité définissent les prédispositions génétiques à développer ultérieurement et dont la réalisation est fonction de l'environnement. À l'image du charpentier qui adapte son toit à la forme de la maison, l'environnement façonne l'architecture du cerveau. Dans les premières années de la vie, les connexions cérébrales prolifèrent rapidement, à raison de 700 nouvelles connexions par seconde (Shonkoff et Phillips, 2000). Leur nombre diminue ensuite par un processus « d'élagage » à mesure que le cerveau se structure pour s'adapter aux exigences de son environnement. Les circuits inférieurs, qui contrôlent les fonctions sensorielles telles que la vue et l'ouïe, sont les premiers à se former. Les circuits supérieurs, sièges des fonctions cognitives, apparaissent plus tard.

Comment l'homme utilise-t-il son cerveau pour apprendre ?

Trois réseaux cérébraux interviennent dans l'apprentissage : le réseau de la « reconnaissance » et les réseaux « stratégique » et « affectif » (figure 5.1) (Rose et Meyer, 2000). Le réseau de la reconnaissance, qui comprend les zones sensorielles telles que le cortex visuel, reçoit des informations provenant de l'environnement

Figure 5.1. Classification des réseaux cérébraux impliqués dans l'apprentissage

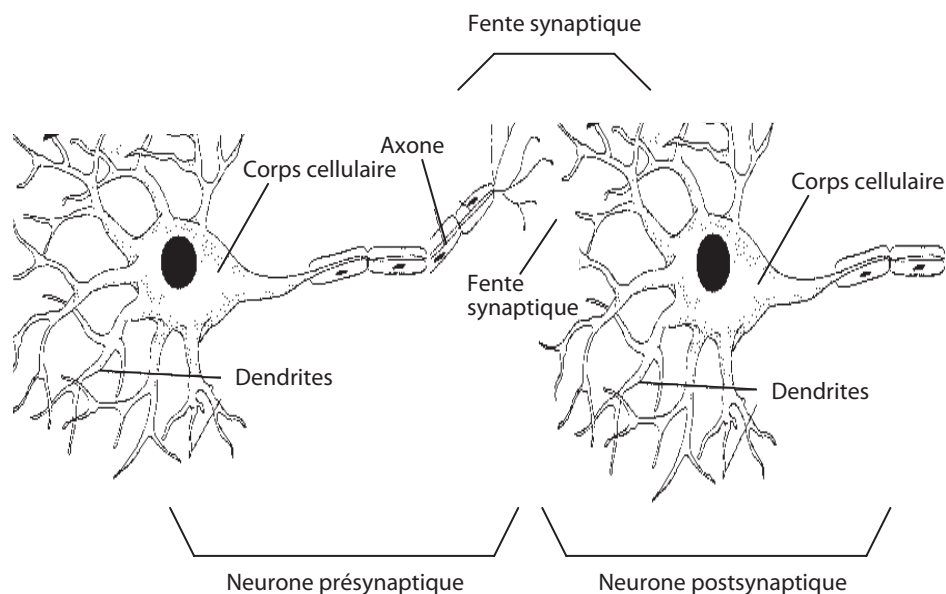


et les transforme en connaissances. Il reconnaît et classe ce que l'enfant voit, entend ou lit. Le réseau stratégique, dont fait partie le cortex préfrontal, planifie et coordonne les actions orientées vers un but. Enfin, le réseau affectif, qui englobe les zones du système limbique, notamment l'amygdale, est le siège des émotions liées à l'apprentissage telles que l'intérêt, la motivation et le stress. Lors d'une tâche d'apprentissage, par exemple la lecture d'un sonnet de Shakespeare, tous ces réseaux travaillent ensemble pour guider le processus d'apprentissage : le réseau de la reconnaissance identifie les lettres, les mots et le style de Shakespeare ; le réseau stratégique se focalise sur la compréhension du texte et suit la progression pour arriver à ce but ; le réseau affectif gère la motivation à poursuivre la lecture.

Ces réseaux se composent de cellules nerveuses spécialisées, appelées neurones, et de cellules gliales, qui les nourrissent et les protègent. Les expériences d'apprentissage sont traduites en signaux électriques et chimiques qui modifient progressivement les connexions interneuronales (Kaczmarek, 1997). Chaque neurone comporte trois parties distinctes : les dendrites, le corps cellulaire et l'axone (figure 5.2). Les dendrites reçoivent un signal chimique en provenance d'une autre cellule en réponse à une expérience. Elles transmettent ce signal au corps cellulaire, qui contient le noyau porteur d'ADN et constitue le siège principal de la synthèse des protéines (essentielle pour convertir la mémoire à court terme en mémoire à long terme). Lorsque ce signal dépasse le seuil d'excitabilité, il déclenche un signal électrique appelé potentiel d'action. Le potentiel d'action se propage le long de l'axone, long filament recouvert d'une gaine de myéline qui entoure et isole les axones et augmente la vitesse de transmission des messages. Lorsqu'il atteint l'extrémité de l'axone, il envoie des signaux chimiques aux dendrites des autres cellules. Le neurone émetteur est qualifié de « présynaptique » et le neurone récepteur de « postsynaptique ». L'axone d'un neurone présynaptique est séparé des dendrites d'un neurone postsynaptique par un petit espace appelé « fente synaptique ».

Les connexions synaptiques se modifient au gré des expériences d'apprentissage et sont amenées à disparaître si elles ne sont pas activées. La figure 5.2 représente ces connexions de manière simplifiée. Dans la réalité, les terminaisons axoniques de nombreux neurones présynaptiques convergent sur les dendrites de chaque neurone postsynaptique. Les stimuli présynaptiques peuvent avoir une influence inhibitrice ou excitatrice : les stimuli plus actifs que les autres sur ce neurone postsynaptique sont renforcés, alors que les moins actifs s'affaiblissent (voire sont éliminés). Cette action excitatrice ou inhibitrice augmente ou diminue le seuil de déclenchement d'un potentiel d'action au niveau de la cellule présynaptique. L'excitation ou l'inhibition initiale de la connexion est temporaire et on estime qu'elle sous-tend la mémoire à court terme. En revanche, l'activité répétée, ou l'absence d'activité, conduit à des modifications significatives à long terme des connexions synaptiques, modifications médiées par la synthèse des protéines. Ce phénomène semble être à la base de la mémoire à long terme (Squire et Kandel, 1999).

Figure 5.2. Connexion entre deux neurones



Avec le temps, ces modifications de la connectivité cellulaire s'additionnent pour produire des changements importants dans la configuration du réseau de la reconnaissance et des réseaux stratégique et affectif (Buonomano, Merzenich, 1998). Par exemple, lorsqu'un enfant apprend à jouer du violon, les connexions neuronales se règlent progressivement pour aboutir à des modifications dans l'organisation du cortex. Alors qu'il s'exerce, les connexions neuronales impliquées dans la dextérité de la main sont actives, ce qui les renforce. En fait, l'aire corticale correspondant aux doigts de la main gauche est plus développée chez les violonistes que chez les autres (Ebert *et al.*, 1995). De même, les connexions corticales utilisées pour le traitement des notes de musique sont renforcées par la pratique du violon et l'aire corticale correspondant aux tons musicaux est plus développée chez les violonistes que chez les autres (Pantev *et al.*, 1998). Au fil du temps, les réseaux cérébraux se réorganisent progressivement sous l'effet des expériences d'apprentissage, et cette réorganisation influence les apprentissages ultérieurs.

Le principal message de toutes ces recherches pour les éducateurs est que le cerveau est fortement modelé par l'expérience. Une expérience éducative réussie peut donc sensiblement améliorer le développement cérébral de l'enfant ou de l'adolescent. C'est rassurant, mais cela veut dire aussi que la société a une lourde responsabilité, car exposer un enfant ou un adolescent à une mauvaise expérience éducative peut menacer l'intégrité physique de son cerveau.

L'émotion et la cognition sont inextricablement liées dans le cerveau

Les expériences émotionnelles sculptent l'architecture du cerveau en développement. En fait, l'émotion et la cognition agissent simultanément sur le cerveau (Barrett, 2006 ; Barrett *et al.*, 2005 ; Damasio, 1994, 2003). Le cerveau est organisé autour d'ensembles de neurones dotés de propriétés et de fonctions spécialisées. Un stimulus déclenche une réponse coordonnée de divers réseaux pour produire une expérience d'apprentissage. On peut, pour plus de commodité, décomposer cette expérience en éléments cognitifs ou émotionnels, mais la distinction entre les deux est toute théorique car ils sont solidaires et inséparables dans le cerveau.

L'émotion et la cognition fonctionnent en interaction pour guider les processus d'apprentissage (Hinton, Miyamoto et Della Chiesa, 2008 ; Fischer et Bidell, 2006). Les enfants et les adolescents ont des objectifs émotionnellement chargés et évaluent de manière cognitive dans quelle mesure une situation fait obstacle ou favorise la réalisation de ces objectifs, ce qui provoque des réactions émotionnelles. Envisageons par exemple le scénario suivant : au lycée, le professeur rend sa copie à Francisco en la posant face contre table. Francisco retourne la feuille et sa note de trois sur vingt lui saute aux yeux. Il mobilise ses structures corticales pour évaluer la situation de manière cognitive : cette note vient contrecarrer ses objectifs (réussir en classe, faire plaisir à sa mère et la convaincre qu'il mérite un *iPhone* pour son anniversaire). Alors qu'il en prend conscience, les structures de son système limbique, et notamment l'amygdale**, déclenchent une réaction émotionnelle et il éprouve des émotions négatives (MacLean, 1952). Ces émotions négatives risquent de venir interrompre les processus d'apprentissage dans le cerveau (OCDE, 2007).

Nous pouvons apprendre à réguler nos réactions émotionnelles de manière cognitive, ce qui peut constituer un mécanisme efficace de coping (ou régulation des émotions). Des études montrent que la régulation émotionnelle peut atténuer les émotions négatives, ce qui se traduit à la fois par une activité plus réduite de l'amygdale et par une expérience émotionnelle subjective plus positive (Ochsner *et al.*, 2004). La réinterprétation et la dépersonnalisation constituent des stratégies efficaces de régulation des émotions. La réinterprétation revient à présenter la situation sous un jour plus positif, alors que la dépersonnalisation consiste à envisager la situation avec plus d'objectivité et à ne pas en faire une question personnelle. Voyons comment ce type de régulation aurait pu aider Francisco dans l'exemple ci-dessus. Il

** Le système limbique est constitué de plusieurs structures cérébrales profondes (amygdale, hippocampe, septum et ganglions de la base) qui jouent un rôle dans les émotions, la mémoire et certains mouvements. L'amygdale est une structure cérébrale profonde impliquée dans les émotions et la mémoire.

aurait pu, pour réguler sa réaction émotionnelle de manière cognitive, réinterpréter cette note comme une petite partie de sa note finale et dépersonnaliser son échec en concluant que le contrôle était difficile pour les autres aussi. Ces stratégies de régulation se traduisent par une augmentation de l'activité des zones corticales impliquées dans la maîtrise de la cognition et une réponse atténuée de l'amygdale. Cette régulation tempère la réaction émotionnelle et permet de se concentrer en classe en dépit d'une déconvenue émotionnelle. Les compétences de régulation émotionnelle peuvent aider les enfants et les adolescents à mieux apprendre.

Les enfants ne savent pas très bien réguler leurs émotions et ils doivent développer ces compétences tout au long de leur enfance et de leur adolescence. Il est démontré qu'avant 12 ans, les enfants sont pratiquement incapables d'atténuer un affect négatif alors que les adolescents (entre 13 et 17 ans) ont une capacité de régulation inférieure de moitié à celle des adultes (Gabrieli, 2004). Ces différences sont probablement d'origine neurobiologique. Une étude a analysé la réponse neurobiologique d'enfants et d'adolescents (entre 9 et 17 ans) à la vue de visages exprimant la peur, un stimulus commun adopté en laboratoire pour évoquer les émotions (Killgore *et al.*, 2001). La neuro-imagerie montre que le développement de l'enfant s'accompagne d'une diminution relative de l'activation de l'amygdale vers le cortex, qu'on peut interpréter comme une augmentation progressive de la régulation cognitive des émotions. Une autre étude a examiné les différences dans le traitement des stimuli émotionnels modulé par l'attention entre les enfants et les adolescents de 9 à 17 ans et les adultes (Monk *et al.*, 2003). Les participants devaient exécuter une tâche exigeant de l'attention alors qu'on leur présentait des stimuli émotionnels. La manipulation a provoqué une activation du cortex plus importante chez les adultes que chez les enfants, ce qui correspondait à une réponse orientée vers le but plus forte chez les adultes que chez les enfants, dont la réponse était brute et déterminée par le stimulus. Les compétences d'autorégulation des émotions doivent être développées progressivement à mesure que l'individu grandit.

Les neurosciences confirment bien que les dimensions émotionnelles et cognitives de l'apprentissage sont inextricablement liées. C'est pourquoi l'éternel débat idéologique sur la nécessité, pour l'institution scolaire, de s'intéresser au développement émotionnel des apprenants n'a plus lieu d'être : si les établissements scolaires sont chargés du développement cognitif, ils interviennent automatiquement dans le développement émotionnel (Hinton, Miyamoto et della-Chiesa, 2008). Dès lors, les éducateurs doivent guider le développement des capacités de régulation des émotions tout comme ils guident le développement des compétences métacognitives.

Langage et littératie

Le cerveau est biologiquement programmé pour acquérir le langage, mais la littératie s'acquiert au fil du temps par une suite de modifications neuronales. Comme l'a si bien exprimé Pinker (1995, p. ix), « les enfants sont prééquipés pour le son, mais l'écrit est un accessoire en option, dont l'installation demande un effort ». Certaines structures du cerveau, situées au niveau de l'aire de Broca et de l'aire de Wernike, sont destinées à l'acquisition du langage et évoluent avec elles (OCDE, 2007). La littératie vient par la suite mobiliser ces aires à mesure que les enfants gagnent en expérience avec l'apprentissage de l'écrit.

Les structures cérébrales impliquées dans l'acquisition du langage réagissent à l'expérience de manière différenciée tout au long de la vie. Certaines structures sont plus malléables à l'expérience à certaines périodes de la vie. On observe une sensibilité développementale dans l'apprentissage de la grammaire et de l'accent. En général, plus tôt on apprend une langue, plus l'assimilation de la grammaire est aisée (Neville et Bruer, 2001). Si l'on expose le cerveau à une langue étrangère dès la petite enfance, c'est l'hémisphère gauche qui traitera la grammaire, comme chez les locuteurs natifs. Lorsqu'on repousse cette exposition à l'adolescence, le traitement est moins efficace (OCDE, 2007). De même, l'enfance est plus propice à l'apprentissage de l'accent (OCDE, 2007). Ces sensibilités signifient que l'apprentissage précoce d'une langue est plus efficace. Il est néanmoins possible d'apprendre une langue étrangère à tout âge.

Les recherches récentes en neurosciences ont permis des avancées considérables en mettant en évidence les réseaux cérébraux impliqués dans la lecture. Alors que les neuroscientifiques entament à peine l'étude de la lecture au niveau de la phrase complète, ils ont fait d'importants progrès dans la compréhension de la lecture au niveau du mot. La « théorie des deux voies » propose un cadre théorique détaillé pour décrire le fonctionnement du cerveau dans le processus de lecture au niveau du mot (Jobard, Crivello et Tzourio-Maxoyer, 2003), tout au moins pour l'anglais car les recherches sur lesquelles elle se fonde ont été conduites essentiellement avec des anglophones et leurs conclusions ne peuvent être automatiquement étendues à l'apprentissage de la lecture dans d'autres langues. Lorsqu'on regarde les mots de cette page, le stimulus est d'abord traité par le cortex visuel primaire, qui appartient au réseau de reconnaissance du cerveau (il se situe dans la région du cortex occipital, qui reçoit en premier les informations visuelles). La théorie des deux voies postule qu'après ce traitement initial de reconnaissance, l'information suit l'une des deux voies complémentaires. La première constitue une étape intermédiaire de conversion des lettres et des mots en sons et leur transfert dans l'aire de Broca, située dans le lobe frontal de l'hémisphère gauche, impliqué dans la parole. La seconde, qui implique « l'aire de la forme visuelle des mots » traduit directement les lettres et les mots en sens.

Cette étude postule qu'en lecture, le traitement phonologique et le traitement sémantique direct ont des rôles essentiels au niveau cérébral. Elle vient éclairer le débat classique sur les avantages comparés des méthodes phonétiques et des techniques d'immersion dans les textes, dites « méthode globale », pour l'enseignement de la lecture. La double importance de ces deux traitements cérébraux laisse à penser qu'une approche équilibrée de l'enseignement de la lecture et de l'écriture qui combinerait méthodes phonétiques et méthode globale serait plus efficace, au moins pour les anglophones.

Toutefois, les circuits neuronaux intervenant dans la lecture ne sont pas exactement les mêmes pour toutes les langues. Certaines structures cérébrales liées au langage, comme l'aire de Broca ou l'aire de Wernicke, sont impliquées dans l'acquisition de la lecture quelle que soit la langue concernée. En revanche, la lecture sollicite aussi différentes aires cérébrales en fonction de la morphologie de la langue concernée. Dans les langues dotées d'une orthographe relativement simple (les lettres correspondent généralement aux sons), les circuits neuronaux impliqués sont assez proches. Par exemple, la voie directe d'accès au sens est sans doute moins sollicitée en italien que dans des langues à orthographe complexe, comme l'anglais, si bien que l'aire de la forme visuelle des mots n'a pas un rôle aussi crucial pour les locuteurs italiens que pour les locuteurs anglais (Paulesu *et al.*, 2001). Cette différence tient sans doute au fait que les italophones peuvent plus facilement recourir au traitement phonologique en lisant car la correspondance lettre/son est plus systématique en italien qu'en anglais. L'apprentissage de la lecture en italien ne construit pas les mêmes circuits neuronaux qu'en anglais, de sorte que les italophones font appel à des circuits neuronaux différents, même lorsqu'ils lisent de l'anglais. Des langues de structures orthographiques différentes sollicitant différents circuits, l'équilibre optimal entre la méthode phonétique et la méthode globale varie d'une langue à l'autre.

La morphologie des mots influence aussi le développement de la littératie au niveau cérébral. La neuro-imagerie a montré qu'en raison de la représentation spatiale des idéogrammes, les locuteurs chinois mobilisent les aires cérébrales associées au traitement spatial (Tan *et al.*, 2003) et ce, même quand ils lisent en anglais. Les circuits cérébraux impliqués dans la lecture ne se développent donc pas de la même manière chez les locuteurs natifs chinois et anglais. Ainsi, cette recherche montre que la littératie peut se développer de multiples manières au niveau cérébral et qu'il convient d'adapter l'enseignement de la lecture aux caractéristiques morphologiques de la langue concernée.

Certains enfants et adolescents ont des difficultés à apprendre à lire avec les méthodes traditionnelles en raison d'un trouble biologique d'acquisition du langage, la dyslexie. Cette pathologie peut revêtir plusieurs formes, mais elle se traduit généralement par des difficultés d'ordre phonologique (Lyon, Shaywitz et Shaywitz, 2003). Les neuroscientifiques ont fait de grands

progrès en identifiant les caractéristiques atypiques du cortex responsables de la dyslexie. Les chercheurs ont ainsi pu mettre au point des interventions ciblées pour permettre aux enfants atteints de dyslexie d'apprendre à lire. Les recherches neuroscientifiques sur le langage et la littératie se multiplient et il est souhaitable que la dimension biologique de ces compétences soit prise en compte dans la conception des politiques et des pratiques éducatives.

Mathématiques

Le traitement cérébral des mathématiques est analogue à celui du langage et de la littératie. En effet, le cerveau est biologiquement programmé pour avoir un sens élémentaire des nombres, mais les compétences formelles en mathématiques se construisent au fil de l'expérience. Les bébés naissent avec un sens des nombres qui leur permet d'utiliser leurs perceptions pour interpréter le monde numériquement. Les enfants et les adolescents construisent cette compétence à mesure de leur apprentissage mathématique.

Les bébés naissent avec plusieurs compétences quantitatives (Wynn, 1998). Ils ont la notion du « un », « deux » et « trois » et peuvent discriminer ces quantités entre elles et d'autres quantités plus importantes. Ils sont en outre capables de discrimination approximative des nombres plus grands. Il est prouvé qu'ils peuvent effectuer des opérations mathématiques simples (Wynn, 1992). Ainsi, lorsqu'un objet, puis un second, est placé derrière un rideau, ils s'attendent à voir deux objets lorsque le rideau est retiré, ce qui laisse penser qu'ils savent que $1+1$ font 2. Ce sens élémentaire des quantités réside le plus souvent dans le lobe pariétal (OCDE, 2007).

Le circuit pariétal est également impliqué dans la représentation de l'espace, et le nombre et l'espace semblent étroitement liés (Dehaene, 1997). Les jeunes enfants conceptualisent souvent le nombre comme étant orienté dans l'espace avant d'être formellement initiés aux nombres et il semble qu'ils aient une prédisposition biologique à associer le nombre à l'espace. En conséquence, les outils pédagogiques tels que les droites numériques et les exercices de manipulation (cubes, réglettes Cuisenaire, jeux de société, instruments de mesure, etc.) peuvent renforcer et consolider l'intuition mathématique chez l'enfant. En effet, l'enseignement des mathématiques qui établit une relation entre le nombre et l'espace peut être très fructueux : un programme qui avait mis en place des expériences faisant appel à la droite numérique et à des manipulations concrètes variées liant les nombres et l'espace a permis de propulser des enfants en retard scolaire en tête de classe après quarante séances de vingt minutes (Griffin, Case et Siegler, 1994).

Les aires cérébrales impliquées dans les mathématiques formelles sont développées par l'expérience et c'est pourquoi les circuits neuronaux responsables des compétences mathématiques sont en fait façonnés par différentes

méthodes d'enseignement. Par exemple, lorsque l'enfant apprend par des exercices d'automatisation, en mémorisant une association entre un résultat donné et deux opérandes, les informations sont encodées dans des zones neuronales différentes de celles qui sont sollicitées lors d'un apprentissage par stratégie, qui consiste à réaliser une série d'opérations arithmétiques (Delazer *et al.*, 2005). Il s'ensuit que deux enfants capables de répondre que $10 + 10$ font 20 ne mobilisent pas les mêmes circuits neuronaux selon que l'un a mémorisé le résultat et que l'autre a adopté une stratégie d'addition à deux chiffres.

Certains enfants rencontrent de grandes difficultés en mathématiques, dont la dyscalculie et la peur des mathématiques sont les plus fréquentes. La dyscalculie est aux mathématiques ce que la dyslexie est à la lecture. Elle est due à un trouble biologique primaire de la perception des nombres dont les scientifiques commencent seulement à étudier les causes neuronales (Landerl, Bevan et Butterworth, 2004). La peur des mathématiques se caractérise par une frayeur pathologique qui vient perturber les stratégies cognitives et la mémoire de travail (Ashcraft, 2002). D'autres études visant à rechercher les causes profondes de la dyscalculie et de la peur des mathématiques devront être entreprises pour mettre en place des interventions ciblées.

Les individus ne se servent pas tous de leur cerveau de la même manière et suivent des voies d'apprentissage différentes

Les éducateurs savent depuis longtemps que les nouveaux savoirs se construisent de différentes manières en fonction des expériences d'apprentissage individuelles et les neuroscientifiques reconnaissent en cela un principe fondamental du mode d'apprentissage du cerveau (OCDE, 2007 ; Schwartz et Fischer, 2003 ; Tobin et Tippins, 1993). L'enseignant sait bien que lorsqu'il lit Cendrillon à sa classe, chaque enfant construit activement un sens différent en fonction de son expérience. En effet, chez certains, la bonne fée, qui est aussi la marraine de Cendrillon, peut faire naître un sentiment de sympathie car elle leur rappelle leur propre marraine, alors que chez d'autres, la bonne fée leur rappelle le spectacle de magiciens auquel ils ont un jour assisté.

Au fil de l'apprentissage, ces nouvelles informations modèlent le cerveau, ce qui l'oriente vers une certaine forme de traitement des informations ultérieures. La lecture en est une bonne illustration. Lorsqu'un enfant apprend à lire dans une langue, les circuits neuronaux responsables de la lecture sont en phase avec l'expérience acquise dans cette langue, ce qui oriente le cerveau vers ces circuits pour les prochaines lectures. Ainsi, l'enfant qui apprend à lire en anglais développe les circuits neuronaux décrits dans la « théorie des deux voies », d'une part la voie indirecte impliquant l'aire de Broca (qui convertit les lettres/mots en sons puis en sens), et d'autre part la voie directe, qui consiste à transformer directement en sens des lettres/mots au niveau de

l'aire de la forme visuelle des mots. Au contraire, les circuits neuronaux développés par un enfant qui apprend à lire en italien impliquent essentiellement la voie indirecte. Lorsque plus tard, ces deux sujets sont invités à lire un texte en anglais (en admettant que l'Italien ait appris l'anglais), leur cerveau traite le texte de manière différente : l'Anglais utilisera les deux voies de traitement des mots et mobilisera à la fois l'aire de Broca et l'aire de la forme visuelle des mots. Pour sa part, l'Italien s'appuiera essentiellement sur la voie indirecte, notamment l'aire de Broca.

Comme l'illustre bien cet exemple sur la lecture, les enfants et les adolescents développent différentes structures cérébrales profondes en fonction de la compétence scolaire en jeu. En d'autres termes, ils suivent différentes voies d'apprentissage. Il appartient donc aux éducateurs de faciliter l'apprentissage en employant de multiples moyens de représentation, d'évaluation et de motivation pour tenir compte du large éventail de particularités individuelles (Rose et Meyer, 2002). Les informations peuvent être présentées sous des formes variées pour offrir aux enfants et adolescents plusieurs « pistes » pour appréhender un concept de base (Gardner, 1983). Pour l'étude des fractions par exemple, on peut proposer aux enfants de confectionner un gâteau et d'utiliser un verre mesureur, de jouer à la marchande et de rendre la monnaie, ou de construire un nichoir en prenant les dimensions des différentes pièces constitutives. Ce type d'activités variées encourage les enfants à se faire une idée personnelle des nombres décimaux, ce qui aide nombre d'entre eux à mieux appréhender les fractions.

L'évaluation, sous ses différentes formes, constitue également un excellent moyen de guider les enfants et les adolescents dans leurs apprentissages. Les évaluations sommatives traditionnelles, telles que les notes, les diplômes et les certificats, peuvent s'accompagner d'évaluations formatives (OCDE, 2005). L'évaluation formative est une évaluation fréquente des progrès réalisés qui met en œuvre tout un ensemble de techniques, notamment les portfolios, les carnets de bord et les rubriques d'évaluation, destinées à orienter tant l'enseignement que l'apprentissage. Elle permet aux éducateurs de guider les enfants tout au long du processus d'apprentissage et d'adapter leur cours aux besoins individuels (voir Wiliam, dans ce volume).

Dans le cadre de l'évaluation formative, les éducateurs peuvent amener les enfants et les adolescents à prendre en charge leur propre apprentissage en développant leurs compétences métacognitives du « savoir apprendre » (Schoenfeld, 1987). L'évaluation formative, dans la mesure où elle met l'accent sur le processus d'apprentissage, encourage les apprenants à développer des compétences métacognitives relatives aux diverses composantes du processus d'apprentissage. L'activité métacognitive consiste à définir des buts, évaluer les progrès et adapter les stratégies d'apprentissage aux situations rencontrées. Ce type d'acquisition est un outil performant qui permet de satisfaire un large éventail de profils individuels car il permet aux apprenants d'être autonomes et de guider ainsi leur propre progression.

Le recours aux multiples moyens d'engagement personnel peut également faciliter la prise en compte des particularités individuelles. Les motivations des enfants et des adolescents peuvent être aussi variées que leurs besoins en matière d'apprentissage et les environnements d'apprentissage doivent proposer des expériences qui correspondent à cette grande diversité d'intérêts. Lorsqu'on enseigne les mesures par exemple, on peut se reporter à la science (« comment un chercheur mesure-t-il les ondes lumineuses ? »,), à la mode (« comment un couturier prend-il les mesures pour confectionner une robe ? »), aux mathématiques (« combien de mètres de fil faut-il pour couper quatre cordes de 20 cm chacune ? »), à la cuisine (« combien y a-t-il de cuillères à café dans une tasse ? »), etc. Cette mise en relation d'un concept de base avec plusieurs thèmes peut motiver les élèves et les adolescents par un large éventail d'activités.

L'individu utilise son cerveau pour apprendre à travers l'interaction sociale dans un contexte culturel

L'enfant et l'adolescent apprennent dans un contexte social et le cerveau humain est préparé à l'interaction sociale. Le cerveau est programmé pour connaître l'empathie, un sentiment qui nous lie intimement à l'expérience d'autrui. Certains neurones du cerveau, appelés neurones miroirs, s'activent pour simuler les expériences vécues par l'autre (Dobbs, 2006). Lorsqu'un enfant observe sa mère empiler des cubes, certains des neurones qui seraient activés s'il construisait lui-même la tour entrent en action. De même, lorsque l'enseignant voit un adolescent pleurer, certains neurones de son cerveau s'activent comme s'il pleurerait lui-même. Ces neurones miroirs, considérés comme le siège neurologique de l'empathie, favorisent à la fois la formation de liens affectifs et l'apprentissage.

Les neurones miroirs sensibilisent biologiquement les enfants et les adolescents à se mettre au diapason d'autrui et à tisser des liens avec les autres, ce qui maintient des interactions avec les adultes et les pairs et soutient ainsi leurs apprentissages. Les adultes et des pairs plus experts apportent un étayage qui permet aux enfants et aux adolescents d'acquérir des connaissances d'ordre supérieur et les conduit à un apprentissage plus rapide et plus riche que s'ils s'étaient livrés à une exploration personnelle (Vygotsky, 1978). Par exemple, lorsque l'enfant cherche à comprendre pourquoi un gros cube de bois flotte en dépit de sa taille, le parent peut l'aider à comprendre en lui proposant stratégiquement d'essayer avec d'autres objets. Les liens affectifs entre le parent et l'enfant facilitent cette interaction, l'enfant est à l'écoute du parent et a confiance en ses suggestions. Ce type d'interactions sociales est essentiel à l'apprentissage. Les contextes qui favorisent les relations positives et le sentiment d'appartenance à la communauté sont propices à l'apprentissage.

À travers leurs interactions avec des membres de leur famille, au sein de l'école ou de la communauté, les enfants et les adolescents nouent des relations avec la société et s'approprient nombre de ses croyances et de ses valeurs. Ces croyances et valeurs culturelles se développent au fil des générations. Génération après génération, les sociétés construisent du sens, dans un processus appelé « évolution culturelle cumulative » (Tomasello, 1999). Cet océan de sens constitue le contexte culturel de l'apprentissage des enfants et des adolescents (Smagorinsky, 2001). La plasticité du cerveau permet à ces éléments de sens culturels d'imprégner la biologie de l'enfant et de l'adolescent ; à mesure qu'il grandit et apprend dans la société, son cerveau est modelé par ces expériences culturellement situées.

Le développement du cerveau s'appuie donc sur les sens créés par les générations précédentes. Les enfants et les adolescents découpent ces éléments de sens avec des outils élaborés par la société et les assemblent pour construire des savoirs. Les langues, par exemple, ont des propriétés assujetties à la culture qui reflètent les valeurs d'une société et influencent le processus de construction de sens des jeunes. Il est important que les enfants et les adolescents étudient ce processus et prennent conscience de leurs préjugés culturels. Des études interculturelles peuvent aider les jeunes à comprendre les différents points de vue de la société dans laquelle ils vivent et les sensibiliser à d'autres cultures et modes de vie. Cette sensibilité culturelle est indispensable dans un monde de plus en plus globalisé.

Implications pour la conception des environnements d'apprentissage

L'élaboration d'environnements d'apprentissage efficaces nécessite l'intégration des données de la recherche sur l'esprit, le cerveau et l'éducation aux connaissances issues d'autres domaines. Les principes dégagés par ce nouveau champ d'étude ont des implications importantes pour la conception des environnements d'apprentissage (Hinton, Miyamoto et della-Chiesa, 2008). C'est pourquoi nous nous appuyerons sur les conclusions de ce chapitre pour reformuler ces implications.

Mettre l'accent sur l'environnement d'apprentissage

Les interactions constantes entre l'inné et l'acquis influencent le développement du cerveau. Si certaines prédispositions génétiques existent, l'environnement exerce une forte influence sur le mode de développement du cerveau. Il est donc souvent possible, et souhaitable, d'infléchir une politique centrée sur le traitement de l'individu vers la restructuration de l'environnement.

Reconnaître l'importance des émotions

Les recherches dans le champ des neurosciences confirment l'étroite imbrication des dimensions émotionnelle et cognitive de l'apprentissage et c'est pourquoi l'éternel débat idéologique sur la nécessité, pour l'institution scolaire, de s'intéresser au développement émotionnel des apprenants n'a plus lieu d'être. En effet, si les établissements scolaires sont chargés du développement cognitif, ils interviennent automatiquement dans le développement émotionnel et doivent favoriser les compétences liées à la régulation des émotions.

Tenir compte des périodes de sensibilité à l'apprentissage d'une langue

Plus l'apprentissage d'une langue étrangère est précoce, meilleure est l'assimilation de l'accent et de la grammaire. L'apprentissage précoce d'une langue dans un environnement propice donne aux enfants un avantage biologique pour l'acquisition de certains aspects de cette langue.

S'inspirer des conclusions des recherches dans le champ des neurosciences pour l'enseignement de la lecture

La double importance du traitement phonologique et du traitement sémantique direct dans l'acte de lecture laisse entrevoir qu'une approche équilibrée de l'enseignement de la lecture peut s'avérer plus efficace pour les langues alphabétiques peu transparentes (faible correspondance entre la lettre et le son) telles que l'anglais. Toutefois, la méthode optimale pourrait varier en fonction de la langue étudiée. Les environnements d'apprentissage doivent s'inspirer des données relatives au traitement de la littérature au niveau cérébral. Les enseignants doivent apprendre à reconnaître les indicateurs de la dyslexie, car une intervention précoce peut éviter aux enfants de souffrir à l'école pendant des années avant d'être diagnostiqués et aidés.

S'inspirer des conclusions des recherches dans le champ des neurosciences pour l'enseignement des mathématiques

Les concepteurs d'environnements d'apprentissage doivent s'appuyer sur les données disponibles dans le domaine des mathématiques et du cerveau. Ils pourraient structurer ceux-ci en tenant compte de l'inclinaison biologique du jeune enfant à comprendre le monde numériquement et de sa base de connaissances informelles, et ainsi faciliter son apprentissage des mathématiques formelles. Par exemple, les environnements d'apprentissage peuvent incorporer des méthodes d'enseignement qui associent nombres et espace car ces capacités sont étroitement liées au niveau cérébral.

Prévoir une multitude de moyens de représentation, d'évaluation et d'engagement personnel

Les environnements d'apprentissage doivent être souples et capables de répondre à un large éventail de spécificités individuelles. Le cerveau est dynamique et les capacités scolaires peuvent se construire selon plusieurs voies différentes d'apprentissage. C'est pourquoi l'environnement d'apprentissage doit prévoir une multitude de moyens de représentation, d'évaluation et d'engagement personnel pour satisfaire aux besoins et intérêts diversifiés des enfants et des adolescents. Les environnements d'apprentissage doivent intégrer l'évaluation formative, susceptible de fortement guider le développement des compétences, et encourager le développement de compétences métacognitives.

Constituer des communautés d'apprentissage fortes

L'apprentissage est une activité sociale. Puisque les relations positives facilitent l'apprentissage, les environnements d'apprentissage doivent être tournés vers la communauté. Le cerveau est programmé pour entrer en relation avec autrui et apprendre des autres. Les adultes et les pairs compétents peuvent proposer un étayage qui permettra aux enfants et aux adolescents d'acquérir des connaissances d'ordre supérieur, et conduira ainsi à un apprentissage plus rapide et plus riche que ne le permettrait l'exploration personnelle.

Créer des environnements d'apprentissage sensibles à l'environnement

Les environnements d'apprentissage doivent être sensibles à la culture. Les sociétés construisent du sens génération après génération, et chaque génération nouvelle apprend dans ce contexte culturel. Les environnements d'apprentissage doivent faire prendre conscience aux enfants et aux adolescents que leurs croyances et leurs pratiques sont largement déterminées par leur culture. Sensibiliser à la dimension culturelle favorise la compréhension des différences interculturelles et des autres modes de vie, ce qui est de plus en plus important dans un monde toujours plus globalisé.

Des études interculturelles peuvent aider les jeunes à comprendre les différents points de vue de la société dans laquelle ils vivent et les sensibiliser à d'autres cultures et modes de vie. Cette sensibilité culturelle est indispensable dans un monde de plus en plus globalisé

Adapter constamment les environnements d'apprentissage en fonction des nouveaux savoirs

Le champ de la recherche sur l'esprit, le cerveau et l'éducation est en pleine évolution et c'est pourquoi les environnements d'apprentissage doivent s'inspirer de cette nouvelle recherche et prendre en compte les conclusions des recherches conduites dans d'autres disciplines et le contexte culturel en jeu.

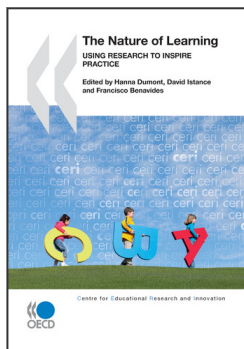
Bibliographie

- Ashcraft, M.H. (2002), « Math Anxiety : Personal, Educational, and Cognitive Consequences », *Current Directions in Psychological Science*, vol. 11, n° 5, pp. 181-185.
- Barrett, L.F. (2006), « Are Emotions Natural Kinds? », *Perspectives on Psychological Science*, vol. 1, n° 1, pp. 28-58.
- Barrett, L.F., P.M. Niedenthal et P. Winkielman (éd.) (2005), *Emotion and Consciousness*, Guilford, New York.
- Bruer, J. (1997), « Education and the Brain : A Bridge Too Far », *Educational Researcher*, vol. 26, n° 8, pp. 4-16.
- Buonomano, D.V. et M.M. Merzenich (1998), « Cortical Plasticity : From Synapses to Maps », *Annual Review of Neuroscience*, vol. 21, n° 1, pp. 149-186.
- Damasio, A.R. (2003), *Looking for Spinoza : Joy, Sorrow, and the Feeling Brain*, Harcourt/Harvest, New York.
- Damasio, A.R. (1994), *Descartes' Error : Emotion, Reason, and the Human Brain*, Grosset/Putnam, New York.
- Dehaene, S. (1997), *The Number Sense : How the Mind creates Mathematics*, Oxford University Press.
- 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, n° 3, pp. 838-849.
- Della Chiesa, B., V. Christoph et C. Hinton (2009), « How Many Brains Does It Take to Build a New Light? Knowledge Management Challenges of a Trans-Disciplinary Project », *Mind, Brain, and Education*, vol. 3, n° 1, pp. 17-26.
- Dobbs, D. (2006), « A Revealing Reflection : Mirror Neurons seem to effect everything from how we learn to speak to how we build culture », *Scientific American Mind*, mai/juin.

- Elbert, T, C. Pantev, C. Wienbruch, B. Rockstroh et E. Taub (1995), « Increased Cortical Representation of the Fingers of the Left hand in String Players », *Science*, vol. 270, n° 5234, pp. 305-307.
- Fischer, K.W. (2009), « Mind, Brain, and Education : Building a Scientific Groundwork for Learning and Teaching », *Mind, Brain, and Education*, vol. 3, n° 1, pp. 2-15.
- Fischer, K.W. et T.R. Bidell (2006), « Dynamic Development of Action, Thought and Emotion », W. Damon et R. M. Lerner (éd.), *Theoretical Models of Human Development, Handbook of Child Psychology*, Wiley, New York, vol. 1, pp. 331-339.
- Fischer, K.W., D.B. Daniel, M.H. Immordino-Yang, E. Stern, A. Battro et H. Koizumi (2007), « Why Mind, Brain and Education? Why Now? », *Mind, Brain and Education*, vol. 1, n° 1, pp. 1-2.
- Fledge, J. et K. Fletcher (1992), « Talker and Listener Effects on Degree », *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, n° 1, pp. 370-389.
- Gabrieli, J. (2004), *Development of Emotions and Learning : A Cognitive Neuroscience Perspective*, Building Usable Knowledge in Mind, Brain, and Education, Cambridge, MA.
- Gardner, H. (1983), *Frames of Mind : The Theory of Multiple Intelligences*, Basic, New York.
- Goswami, U. (2006), « Neuroscience and Education : From Research to Practice », *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 7, n° 5, pp. 406-413.
- Griffin, S., R. Case et R. Siegler (1994), « Rightstart : Providing the Central Conceptual Prerequisites for First Formal Learning of Arithmetic to Students At-risk for School Failure », K. McGilly (éd.), *Classroom Lessons : Integrating Cognitive Theory and Classroom Practice*, Bradford Books MIT Press, Cambridge, MA, pp. 24-49.
- Hinton, C. et K.W. Fischer (2008), « Research Schools : Grounding Research in Education Practice », *Mind, Brain and Education*, vol. 2, n° 4, pp. 157-160.
- Hinton, C., K. Miyamoto et B. Della-Chiesa (2008), « Brain Research, Learning and Emotions : Implications for Education Research, Policy, and Practice », *European Journal of Education*, vol. 43, n° 1, pp. 87-103.
- 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, n° 2, pp. 693-712.
- Kaczmarek, L. (1997), *The Neuron*, Oxford University Press, New York.

- Killgore, W.D.S., M. Oki et D.A. Yurgelun-Todd (2001), « Sex-Specific Developmental Changes in Amygdala Responses to Affective Faces », *Neuroreport*, vol. 12, n° 2, pp. 427-433.
- 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.
- Lyon, G.R., S.E. Shaywitz et B.A. Shaywitz (2003), « A Definition of Dyslexia », *Annals of Dyslexia*, vol. 53, pp. 1-14.
- MacCabe, D.P. et A.D. Castel (2008), « Seeing is Believing : The Effect of Brain Images on Judgments of Scientific Reasoning », *Cognition*, vol. 107, n° 1, pp. 343-352.
- MacLean, P.D. (1952), « Some Psychiatric Implications of Physiological Studies on Frontotemporal Portion of Limbic System (visceral brain) », *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 4, pp. 407-418.
- Monk, C.S., E.B. McClure, E.E. Nelson, E. Zarahn, R.M. Bilder, E. Leibenluft, D.S. Charney, M. Ernst et D.S. Pine (2003), « Adolescent Immaturity in Attention-Related Brain Engagement to Emotional Facial Expression », *NeuroImage*, vol. 20, n° 1, pp. 420-428.
- Neville, H.J. et J.T. Bruer (2001), « Language Processing : How Experience Affects Brain Organisation », D.B. Bailey, J.T. Bruer, F.J. Symons et J.W. Lichtman (éd.), *Critical Thinking about Critical Periods*, Paul H. Brookes Publishing Co., Maryland, pp. 151-172.
- OCDE (2005), *L'évaluation formative : pour un meilleur apprentissage dans les classes secondaires*, Éditions OCDE, Paris.
- OCDE (2007), *Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage*, Éditions OCDE, Paris.
- Ochsner, K.N., R.D. Ray, J.C. Cooper, E.R. Robertson, S. Chopra, J.D. Gabrieli, J.J. Gross (2004), « For Better or for Worse : Neural Systems Supporting the Cognitive Down-and Up-regulation of Negative Emotion », *NeuroImage*, vol. 23, n° 2, pp. 483-499.
- Pantev, C., R. Oostenveld, A. Engelien, B. Ross, L.E. Roberts, M. Hoke (1998), « Increased Auditory Cortical Representation in Musicians », *Nature*, vol. 23, n° 392, pp. 811-814.
- Paulesu, E., J.F. Démonet, F. Fazio, E.M.C. Crory, V. Chamoine, N. Brunswick, 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.

- Pickering, S.J. et P. Howard-Jones (2007), « Educators' Views on the Role of Neuroscience in Education : Findings from a Study of UK and International Perspectives », *Mind, Brain and Education*, vol. 1, n° 3, pp. 109-113.
- Pinker, S. (1995), *The Language Instinct. How the Mind Creates Language*, Harper Collins, New York.
- Rose, D. et A. Meyer (2000), « Universal Design for Individual Differences », *Educational Leadership*, vol. 58, n° 3, pp. 39-43.
- Rose, D. et A. Meyer (2002), *Teaching Every Student in the Digital Age : Universal Design for Learning*, CAST, Massachusetts.
- Schoenfeld, A. (1987), « What's All the Fuss about Metacognition? », A. Schoenfeld (éd.), *Cognitive Science and Mathematics Education*, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, pp. 189-215.
- Schwartz, M.S. et K.W. Fischer (2003), « Building vs. Borrowing : The Challenge of Actively Constructing Ideas », *Liberal Education*, vol. 89, n° 3, pp. 22-29.
- Shonkoff, J.P. et D.A. Phillips (éd.) (2000), *From Neurons to Neighborhoods : The Science of Early Childhood Development*, National Academy Press, Washington, DC.
- Smagorinsky, P. (2001), « If Meaning is Constructed, What is it Made of? Toward a Cultural Theory of Reading », *Review of Educational Research*, vol. 71, n° 1, pp. 133-169.
- Squire L.R. et E.R. Kandel (1999), *Memory : From Mind to Molecules*, Scientific American Library, New York.
- Tan, L.H., J.A. Spinks, C.M. Feng, W.T. Siok, C.A. Perfetti, J. Xiong, P.T. Fox et J.H. Gao (2003), « Neural Systems of Second Language Reading Are Shaped by Native Language », *Human Brain Mapping*, vol. 18, n° 3, pp. 158-166.
- Tobin, K. et D. Tippins (1993), « Constructivism as a Referent for Teaching and Learning », K. Tobin (ed.), *The Practice of Constructivism in Science Education*, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, pp. 3-21.
- Tomasello, M. (1999), *The cultural Origins of Human Cognition*, Harvard University Press, Massachusetts.
- Vygotsky, L.V. (1978), *Mind in Society*, Harvard University Press, Massachusetts.
- Wynn, K. (1992), « Addition and Subtraction by Human Infants », *Nature*, vol. 358, n° 6389, pp. 749-750.
- Wynn, K. (1998), « Numerical Competence in Infants », C. Donlan (éd.), *The Development of Mathematical Skills*, Psychology Press, Hove, RU.



Extrait de :
The Nature of Learning
Using Research to Inspire Practice

Accéder à cette publication :
<https://doi.org/10.1787/9789264086487-en>

Merci de citer ce chapitre comme suit :

Hinton, Christina et Kurt W. Fischer (2010), « Perspective développementale et biologique de l'apprentissage », dans Hanna Dumont, David Istance et Francisco Benavides (dir. pub.), *The Nature of Learning : Using Research to Inspire Practice*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264086944-7-fr>

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com.