

---

**Mieux comprendre les mécanismes  
cérébraux d'apprentissage pour faciliter la  
mise en application des connaissances  
issues de la recherche et favoriser la  
réussite scolaire des élèves**

---

Lorie-Marlène Brault Foisy, Professeure au  
Département de didactique, Université du  
Québec à Montréal

Steve Masson, Professeur au Département  
de didactique, Université du Québec à  
Montréal

**\*Auteur correspondant :**

Lorie-Marlène Brault Foisy  
Faculté des sciences de l'éducation  
Département de didactique  
Université du Québec à Montréal (UQAM)  
Québec, Canada  
Email : [brault-foisy.lorie-marlene@uqam.ca](mailto:brault-foisy.lorie-marlene@uqam.ca)

**Note des auteurs**

Cet article reprend certains passages de la thèse doctorale de l'auteure : Brault Foisy, L.-M. (2020). Effets de deux interventions sur le fonctionnement cérébral dans le contexte d'un apprentissage nécessitant du recyclage neuronal [Thèse de doctorat non publiée]. Université du Québec à Montréal, Montréal.

**Citation :** Brault Foisy, L.-M. et Masson, S. (2022) Mieux comprendre les mécanismes cérébraux d'apprentissage pour faciliter la mise en application des connaissances issues de la recherche et favoriser la réussite scolaire des élèves. *Cortica* 1(1), 219–235. <https://doi.org/10.26034/cortica.2022.1956>

**Résumé**

Souvent désignée « décennie du cerveau », la décennie des années 90 a été marquée par l'accroissement des connaissances neuroscientifiques et l'avènement de nouvelles technologies d'imagerie cérébrale. Ces progrès en neurosciences ont progressivement mené la communauté de recherche à se questionner sur les retombées possibles des connaissances neuroscientifiques pour le domaine de l'éducation. Une nouvelle approche de recherche interdisciplinaire a ainsi émergé : la neuroéducation. Cette approche s'intéresse à des problématiques propres au milieu de l'éducation à l'aide d'un niveau d'analyse qui est celui du fonctionnement cérébral. La neuroéducation cherche donc à établir un pont entre le fonctionnement cérébral, les mécanismes liés à l'apprentissage et l'enseignement. De l'avis de plusieurs chercheurs et organisations internationales, une meilleure compréhension du cerveau pourrait en effet fournir des pistes intéressantes afin de mieux comprendre ce qui caractérise différents apprentissages sur le plan cérébral et, ultimement, guider le choix d'approches pédagogiques mieux adaptées à l'organisation et au fonctionnement du cerveau des élèves. D'une part, la neuroéducation permet en ce sens une compréhension plus fondamentale de différents apprentissages scolaires en s'intéressant aux changements qui s'opèrent durant l'apprentissage grâce à la neuroplasticité. D'autre part, plusieurs recherches ont mis en évidence que la neuroplasticité ne serait pas infinie et présenterait certaines limites. Elle serait en effet influencée par différentes contraintes, en particulier par la structure et l'organisation initiale du cerveau, c'est-à-dire l'architecture cérébrale préalable à l'apprentissage. Dans la lignée des recherches menées en psychologie cognitive, les résultats des recherches en neuroéducation fournissent déjà des points de repère intéressants pour guider le choix de

certaines stratégies pédagogiques. Néanmoins, la mise en application des résultats de recherche à la salle de classe représente un défi considérable. À cet égard, le présent article vise à discuter de l'idée qu'une meilleure compréhension des mécanismes cérébraux d'apprentissage pourrait faciliter la mise en application des connaissances issues de la recherche et ainsi favoriser la réussite scolaire des élèves.

**Mots-clés :** neuroéducation; contraintes cérébrales; neuroplasticité; enseignement

### Abstract

Often referred to as the "decade of the brain," the decade of the 1990s was marked by the growth of neuroscience knowledge and the advent of new brain imaging technologies. These advances in neuroscience gradually led the research community to question the potential impact of neuroscientific knowledge on the field of education. A new interdisciplinary research approach has thus emerged: neuroeducation. This approach focuses on problems specific to the field of education using a level of analysis that is that of brain function. Neuroeducation therefore seeks to establish a bridge between brain functioning, the mechanisms related to learning and teaching. In the opinion of several researchers and international organizations, a better understanding of the brain could indeed provide interesting avenues to better understand what characterizes different learning processes at the brain level and, ultimately, guide the choice of pedagogical approaches that are better adapted to the organization and functioning of the students' brain. On the one hand, neuroeducation allows for a more fundamental understanding of various school learning processes by focusing on the changes that occur during learning through brain plasticity. On the other hand, several studies have shown that neuroplasticity is not infinite and has certain

limits. It would indeed be influenced by different constraints, in particular by the initial structure and organization of the brain, i.e. the cerebral architecture prior to learning. In line with research in cognitive psychology, neuroeducational research findings already provide valuable insights to orient the choice of teaching strategies. Nevertheless, the application of research findings to the classroom presents a considerable challenge. In this respect, the present article aims to discuss the idea that a better understanding of the brain mechanisms of learning could facilitate the application of research findings and thus promote the academic success of students.

**Keywords:** neuroeducation; brain constraints; neuroplasticity; teaching

.....

### Introduction

Depuis déjà plusieurs années, la réussite scolaire occupe une place centrale dans les discours et les actions éducatives gouvernementales à l'échelle internationale. Cette préoccupation pour la réussite scolaire s'exprime de différentes façons : évaluations standardisées et répétées des acquis scolaires, modifications aux programmes de formation, élaboration de plans d'action, etc. Pour favoriser la réussite des élèves, l'un des moyens mis de l'avant par la communauté scientifique (Stephenson, 2009; Pasquinelli, 2015; Slavin, 2002; Masson, 2015; Newton, 2015; Hattie, 2013, 2015), mais également par les décideurs politiques (p.ex., Conseil supérieur de l'éducation, 2006; National Research Council, 2002) consiste à favoriser l'adoption de pratiques éducatives efficaces prenant appui sur des résultats de recherche. Le principe d'une éducation fondée sur la recherche scientifique consiste en ce sens à identifier les pratiques éducatives pour lesquelles des résultats de recherches empiriques démontrent qu'elles sont

susceptibles de produire des résultats positifs en termes d'apprentissage (en anglais, on les désigne souvent par le terme *evidence-based practices*, EBPs, Forman, 2015; Reddy, Forman, Stoiber et Gonzalez, 2017; Slavin, 2002). Il peut s'agir de stratégies pédagogiques, d'interventions éducatives ou de programmes d'enseignement qui produisent des résultats positifs, lorsqu'évalués par le biais d'un protocole expérimental (Mesibov et Shea, 2011; Simpson, 2005). À titre d'exemples, les domaines de la médecine, de la psychologie, de l'ingénierie et de l'agriculture ont d'ailleurs emprunté cette voie afin d'établir des ponts entre la recherche et les milieux de la pratique (Pasquinelli, 2015; Slavin, 2002; Masson, 2015).

Par ailleurs, il est souvent mis de l'avant que l'enseignement constitue une action pour laquelle il n'apparaît pas possible d'appliquer une « recette pédagogique » que l'on estimerait fonctionner pour tous les contextes, sans exception. Néanmoins, tout comme d'autres domaines s'appuient sur les données de recherche pour guider le choix des pratiques à privilégier, la recherche peut contribuer à délimiter un terrain plus fertile à l'apprentissage, en guidant la sélection de certaines pratiques pédagogiques. En ce sens, une analogie a été proposée par Willingham (2013) qui présente une comparaison entre l'enseignement et l'architecture.

Pour construire une maison, l'architecte doit respecter certains principes qui proviennent de la recherche scientifique : les lois de la physique et des matériaux par exemple. Ces principes déterminent un champ de possibilités pour la construction, mais ne dictent pas de quoi la maison aura l'air. La création de la maison se fera également à partir d'un ensemble d'éléments créatifs,

émotifs, culturels, etc. qui ne sont pas déterminés par la science, mais par une prise en compte humaine et émotive du contexte. En éducation, les principes issus de la recherche en éducation, psychologie, sociologie, etc. peuvent également délimiter un certain cadre à partir duquel l'enseignant s'adapte à ses élèves et au contexte dans lequel il se trouve et réalise les choix pédagogiques qu'il juge optimaux. Dans cette optique, un nombre croissant de recherches visent à évaluer l'efficacité de différentes pratiques éducatives par le biais d'une méthodologie rigoureuse (Pasquinelli, 2015). Plus récemment, il a été mis de l'avant que l'identification de pratiques éducatives efficaces pourrait également bénéficier d'une meilleure compréhension des processus cognitifs et cérébraux impliqués dans l'acte d'apprendre (Pasquinelli, 2015 ; Masson, 2020).

### **S'intéresser aux mécanismes cérébraux sous-tendant les apprentissages scolaires**

Les neurosciences ont connu un développement important depuis les années 90 (Houdé *et al.*, 2004; OCDE, 2007) que l'on nomme souvent la « décennie du cerveau » (Geake et Cooper, 2003). En effet, grâce au développement de techniques d'imagerie cérébrale, dont l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), et à l'essor des connaissances sur le fonctionnement du cerveau, il est devenu possible d'obtenir des images de l'activité du cerveau *in vivo* lors de la réalisation d'une tâche motrice ou cognitive (Ward, 2010) et d'interpréter ces images afin d'obtenir des informations supplémentaires en lien avec les fonctions cérébrales qui sont sollicitées pour résoudre la tâche. Les neurosciences permettent ainsi de cerner et d'approfondir certains éléments particulièrement importants au regard des relations entre le cerveau et l'apprentissage. Les progrès en neurosciences ont d'ailleurs mené la communauté éducative à se

questionner sur les retombées possibles des connaissances neuroscientifiques pour le domaine de l'éducation en général et, plus spécifiquement, pour l'enseignement (Masson et Brault Foisy, 2014; OCDE, 2007). Cette idée d'étudier des problématiques éducatives en s'appuyant sur les connaissances issues des neurosciences a mené à l'émergence du champ de recherche interdisciplinaire de la neuroéducation. Le terme neuroéducation (Ansari, De Smedt et Grabner, 2012; Battro, Fischer et Léna, 2010; Masson, 2012), introduit par Battro et Cardinali (1996), est surtout connu dans la littérature anglophone sous l'appellation *Mind, Brain and Education* (Fischer, Daniel, Immordino-Yang, Stern, Battro et Koizumi, 2007; Fischer, 2009) ou encore *Educational Neuroscience* (Fischer *et al.*, 2010; Geake, 2009; McCandliss, 2010). La neuroéducation s'inscrit directement dans les efforts déployés pour mieux appuyer les pratiques et les politiques éducatives sur les données issues de la recherche (Fischer, 2009; Fischer *et al.*, 2010; Goswami, 2008; OCDE, 2007; Pasquinelli, 2011; Royal Society, 2011).

Les recherches menées en neuroéducation se distinguent des recherches en neurosciences, car leur but premier n'est pas de mieux comprendre le cerveau humain, mais plutôt d'apporter des données issues des neurosciences permettant d'éclairer certaines problématiques qui sont propres au milieu de l'éducation. Ultimement, rendre les données cérébrales utiles au milieu de l'éducation fait donc partie intégrante des objectifs poursuivis par la neuroéducation. En introduisant la variable de l'activité cérébrale dans la recherche en éducation, la neuroéducation a ainsi pour objectif d'établir un pont entre les connaissances sur le fonctionnement du cerveau, les mécanismes d'apprentissage et l'enseignement (Masson, 2012; Masson et Brault Foisy, 2014).

En ce sens, l'apport des neurosciences au

domaine de l'éducation permet de jeter un nouvel éclairage sur la « boîte noire » de l'apprentissage (Fischer *et al.*, 2010) en identifiant les processus cérébraux impliqués dans certains apprentissages scolaires ou encore en analysant les effets de certaines interventions pédagogiques sur le fonctionnement du cerveau (Goswami, 2006; Masson, 2012). Plusieurs chercheurs mettent aussi de l'avant l'idée qu'une meilleure compréhension du cerveau pourrait ultimement aider à mieux enseigner (Masson, 2014; Pasquinelli, 2011; Spitzer, 2012).

Il apparaît en ce sens qu'une meilleure compréhension des mécanismes cérébraux d'apprentissage et des modifications qui s'opèrent au niveau cérébral lors d'un nouvel apprentissage apporterait un certain nombre d'avantages sur le plan éducatif. Cela offre notamment la possibilité de générer des hypothèses inédites quant aux stratégies pédagogiques qui seraient à privilégier, en lien avec ces mécanismes. La formulation d'hypothèses permet ainsi de mieux cibler et de préciser les stratégies pédagogiques à tester en vue d'en mesurer l'efficacité. Une meilleure compréhension des mécanismes cérébraux impliqués dans différents apprentissages permet aussi de comprendre, à un niveau d'analyse plus fondamental, pourquoi certaines stratégies pédagogiques semblent mieux fonctionner que d'autres.

### **Le rôle fondamental de la neuroplasticité dans l'apprentissage**

À cet égard, après près d'une vingtaine d'années d'existence, la neuroéducation et les recherches en neurosciences apportent des informations intéressantes pour le domaine de l'éducation. La relation entre les neurosciences et l'éducation s'articule notamment autour de deux éléments centraux. Le premier élément concerne la neuroplasticité, c'est-à-dire la capacité du

cerveau à s'adapter en modifiant son activité et ses connexions neuronales lors de l'apprentissage (OCDE, 2007; Pascual-Leone *et al.*, 2005). Longtemps, il a été considéré que le cerveau se développait au début de la vie et qu'ensuite, sa structure était définie et qu'elle demeurait stable (OCDE, 2007). Or, il est clair aujourd'hui que cette idée est inexacte. En effet, bien qu'il soit vrai que le cerveau est particulièrement malléable au cours de la petite enfance, celui-ci conserve la capacité de modifier son fonctionnement et sa structure tout au long de la vie pour s'adapter à différents contextes et pour développer de nouvelles habiletés (OCDE, 2007; Ward, 2010). De nos jours, la plasticité est reconnue comme étant le mécanisme fondamental, sinon le seul, permettant d'induire des changements qui sont observables sur le plan comportemental (Berlucchi et Buchtel, 2009).

En effet, l'agencement particulier des connexions neuronales joue un rôle crucial dans le fonctionnement du cerveau, c'est-à-dire dans l'activation ou non de certains neurones, et influence ultimement les fonctions cognitives qui s'accomplissent (OCDE, 2007). Sans cette flexibilité, aucun apprentissage scolaire ne serait possible. Il est d'ailleurs aujourd'hui bien démontré que les apprentissages scolaires modifient le fonctionnement et la structure du cerveau des apprenants (Dehaene *et al.*, 2010; Kwok *et al.*, 2011). Durant l'apprentissage, certaines connexions qui ne sont pas utiles peuvent ainsi être éliminées, de nouvelles connexions peuvent être créées et l'efficacité de certaines connexions déjà existantes peut être modulée à la hausse ou à la baisse, selon leur importance (Geake et Cooper, 2003; OCDE, 2007). En modifiant et en optimisant ses connexions neuronales, le cerveau devient également plus spécialisé : certaines régions cérébrales prennent ainsi en charge des fonctions cognitives bien précises (OCDE, 2007; Ward, 2010). Les connexions

neuronales et le fonctionnement du cerveau ne sont donc pas fixes, mais plutôt flexibles. Il devient alors pertinent d'identifier et de chercher à mieux comprendre ce qui caractérise différents apprentissages scolaires sur le plan cérébral.

La compréhension des règles qui régissent la connexion et la mise en réseaux de neurones durant l'apprentissage remonte aux travaux fondateurs de Hebb (1949). L'idée centrale mise de l'avant par ce chercheur est que les neurones qui s'activent ensemble se connectent ensemble (*Neurons that wire together fire together*). L'explication plus complète est que lorsqu'un neurone A se situe suffisamment près pour exciter un neurone B et que, de façon répétée et persistante, le neurone A prend part à l'activation du neurone B, des mécanismes de croissance induits par des modifications moléculaires se mettent en place de telle sorte que l'activité du neurone A facilite inmanquablement l'activité du neurone B (Hebb, 1949). Dans un contexte donné, au contact d'un contenu d'apprentissage particulier : « [...] des connexions neuronales sont créées ou renforcées, d'autres sont affaiblies ou éliminées, selon les besoins [...] » (OCDE, 2007, p. 13). Pour illustrer ces modifications des connexions entre les neurones, une analogie est souvent proposée (Potvin, 2013; Masson, 2020) selon laquelle l'établissement de connexions serait semblable à la création de sentiers au cœur d'une forêt : au début d'un apprentissage, la création de nouvelles connexions est exigeante, tout comme l'instauration du tracé d'un nouveau sentier dans une forêt sauvage. Puis, plus le sentier est emprunté, plus celui-ci devient praticable et plus il devient facile de se déplacer d'un point A à un point B (comme l'influx nerveux se propage plus efficacement au fur et à mesure que les connexions neuronales sont mobilisées). À l'inverse, si le sentier n'est plus utilisé, la végétation reprendra sa place et celui-ci disparaîtra. De



la même façon, les connexions neuronales qui ne sont plus utiles seront éliminées. Le concept de neuroplasticité permet donc d'établir un premier pont entre le cerveau et l'apprentissage. Ce que l'enseignant observe chez ses élèves sur le plan comportemental, qu'il s'agisse d'une amélioration de la performance à une tâche, de la vitesse d'exécution, de l'aisance à accomplir un exercice, etc. découle de modifications qui s'opèrent au niveau des connexions entre les neurones du cerveau. Le concept de neuroplasticité renvoie ainsi à l'idée que le cerveau est un organe flexible qui possède la capacité de se modifier tout au long de la vie pour s'adapter à son environnement et pour apprendre.

### **Des contraintes posées par le fonctionnement et l'architecture du cerveau**

Par ailleurs, bien que la neuroplasticité constitue une condition sine qua non pour établir un pont entre les domaines de l'éducation et des neurosciences (Masson et Brault Foisy, 2014), la pertinence de mener des recherches en neuroéducation demeurerait limitée si le cerveau était flexible au point de pouvoir se modifier et apprendre avec autant de facilité, quel que soit le type d'intervention pédagogique mise en place (Dehaene, 2008). Or, un deuxième élément permet de mieux comprendre les retombées éducatives des recherches sur le cerveau. En effet, des chercheurs ont mis en évidence que la neuroplasticité ne serait pas infinie et présenterait certaines limites (Dehaene, 2008; Houdé, 2014; Masson, 2014; Masson et Brault Foisy, 2014). Elle serait influencée par différentes contraintes, en particulier par le fonctionnement biologique du cerveau ainsi que sa structure et son organisation initiale, c'est-à-dire son architecture cérébrale préalable à l'apprentissage (Dehaene, 2008). La relation entre le cerveau et l'apprentissage apparaît donc bidirectionnelle :

l'apprentissage modifie le fonctionnement du cerveau en raison de sa plasticité, mais, réciproquement, le cerveau impose des contraintes à la façon dont certains apprentissages peuvent se réaliser. Cette idée de « contraintes » vient du fait qu'avant même qu'un nouvel apprentissage ne se réalise, le cerveau présente une architecture initiale qui découle notamment de l'évolution ainsi que de facteurs épigénétiques et qui est très similaire d'une personne à l'autre (Dehaene, 2005). Cette façon dont le cerveau est structuré et organisé avant l'apprentissage ainsi que son fonctionnement auraient un impact sur la façon dont certains apprentissages pourraient s'accomplir sur le plan cérébral.

Par exemple, le cerveau possède des réseaux de neurones très solidement établis qui peuvent parfois poser des contraintes à la réalisation d'un nouvel apprentissage. En sciences notamment, plusieurs recherches indiquent qu'avant même leur entrée à l'école, les élèves détiennent souvent des conceptions non scientifiques par rapport à plusieurs phénomènes naturels qui sont particulièrement difficiles à faire évoluer dans le cadre d'un enseignement formel (Carey, 2000; Liu, 2001; Potvin, 2013). Des recherches suggèrent que certaines conceptions non scientifiques ne disparaîtraient peut-être jamais du cerveau des élèves, parce qu'elles découleraient d'intuitions fondamentales inscrites dans le cerveau sous la forme de réseaux de neurones très ancrés et qui ne peuvent sans doute pas être modifiés (Masson, Potvin, Riopel et Brault Foisy, 2014; Potvin, 2013; Potvin, Masson, Lafortune et Cyr, 2014). Cela s'explique notamment par le fait que certaines idées qui ne sont pas en accord avec les conceptions reconnues par la communauté scientifique peuvent s'avérer suffisamment efficaces dans de nombreux contextes du quotidien. Par exemple, l'intuition selon laquelle « plus on se rapproche d'une source

de chaleur, plus il fait chaud » est vraie et utile, notamment car elle peut permettre de prévenir une brûlure. Cependant, cette intuition peut également mener à une explication non scientifique du phénomène des saisons selon laquelle il ferait plus chaud l'été parce que la Terre serait plus près du Soleil. Cet exemple permet d'illustrer pourquoi les réseaux de neurones associés à une intuition initiale sont difficilement modifiables et peuvent poser un défi supplémentaire lors de l'apprentissage des sciences.

En effet, pour apprendre les sciences, les élèves devraient alors apprendre à contrôler et à résister à ces intuitions (à bloquer l'utilisation des réseaux de neurones préexistants) en ayant recours à des régions cérébrales liées à l'inhibition, c'est-à-dire la capacité du cerveau à contrôler ses intuitions et ses habitudes spontanées en nuisant à l'activation des réseaux de neurones responsable de ces intuitions et habitudes (Masson *et al.*, 2014; Brault Foisy, Masson, Potvin et Riopel, 2015; Allaire-Duquette *et al.*, 2021). Dans cet exemple, l'architecture cérébrale initiale de l'élève joue donc un rôle déterminant dans l'apprentissage parce qu'elle vient influencer et contraindre la façon dont certains apprentissages qui entrent en compétition avec les réseaux de neurones préexistants peuvent prendre place dans le cerveau. Dans ce cas précis, apprendre exige un effort supplémentaire puisqu'il nécessite de bloquer l'activation spontanée des réseaux neuronaux qui ne sont pas appropriés.

Un autre exemple de contrainte cérébrale liée à l'apprentissage concerne le fait que des régions précises du cerveau seraient possiblement mieux disposées que d'autres à prendre en charge certaines fonctions cognitives, c'est-à-dire à accueillir certains apprentissages associés à des inventions culturelles tels que ceux liés à la lecture et au

calcul. Ces régions constitueraient des niches privilégiées (Dehaene et Cohen, 2007) pour accueillir certains apprentissages en raison de leur localisation dans le cerveau, de leurs connexions déjà établies avec d'autres régions cérébrales ou encore parce qu'elles accomplissent déjà une fonction similaire (Goswami, 2008). Cette idée selon laquelle la fonction initiale d'une région cérébrale est modifiée pour acquérir de nouvelles compétences est souvent désignée par le terme « recyclage neuronal » (Dehaene, 2005; Dehaene et Cohen, 2007). Le recyclage neuronal (Dehaene, 2007) implique qu'en raison de la façon dont le cerveau est organisé (c'est-à-dire la façon dont les neurones sont interconnectés les uns aux autres), ce dernier présente des prédispositions pour se modifier d'une certaine façon plutôt que d'une autre durant l'apprentissage.

En effet, cette contrainte du recyclage neuronal s'appuie sur le fait que les capacités d'adaptation des neurones ne seraient pas infinies et demeureraient liées aux contraintes biologiques (Dehaene, 2007). Dans cet autre exemple, apprendre exige donc un effort particulier puisqu'il nécessite de reconfigurer une partie des réseaux neuronaux d'une région du cerveau afin de les dédier à un nouvel usage. Les apprentissages nécessitant du recyclage neuronal ne sont donc pas faciles parce qu'ils nécessitent une transformation relativement importante de l'architecture initiale du cerveau de l'élève.

Cette découverte selon laquelle l'architecture cérébrale initiale (Dehaene, 2008) des élèves influence les apprentissages futurs peut être rapprochée de l'idée constructiviste voulant que les connaissances antérieures jouent un rôle important dans l'acquisition de nouvelles connaissances. Tout comme il est utile pour les enseignants de connaître les connaissances antérieures des élèves pour

mieux leur enseigner, mieux connaître la structure et le fonctionnement du cerveau des élèves pourrait également aider les enseignants à comprendre les mécanismes associés aux apprentissages scolaires, à saisir pourquoi certains apprentissages sont plus difficiles et, surtout, à choisir et mettre en place des stratégies pédagogiques mieux adaptées à l'organisation et au fonctionnement du cerveau des élèves.

### **Réfléchir l'enseignement à la lumière des mécanismes cérébraux d'apprentissage**

Savoir que l'apprentissage modifie l'architecture du cerveau et que l'architecture cérébrale influence l'apprentissage est certes intéressant pour le domaine de l'éducation, mais serait de peu d'utilité si les enseignants et les autres intervenants du domaine de l'éducation ne pouvaient pas, par les choix pédagogiques qu'ils font, avoir un effet sur ces contraintes cérébrales et faciliter la mise en place de certains apprentissages sur le plan cérébral (Dehaene, 2007; Masson et Brault Foisy, 2014). Il devient donc intéressant de se questionner à savoir si la prise en compte des contraintes cérébrales dans le choix des stratégies pédagogiques qui sont mises en place peut avoir une incidence sur l'apprentissage et sur les modifications cérébrales qui découlent de cet apprentissage.

Plusieurs chercheurs ont ainsi commencé à explorer cette idée que la prise en compte des contraintes découlant des mécanismes cérébraux d'apprentissage pourrait mener à l'adoption de stratégies pédagogiques qui influencent différemment le fonctionnement du cerveau (Delazer *et al.*, 2005; Houdé *et al.*, 2001; Van Duijvenvoorde, Zanolie, Rombouts, Raijmakers et Crone, 2008; Yoncheva, Blau, Maurer et McCandliss, 2010 ; Masson, 2020).

Certains principes neuroéducatifs ont même été identifiés afin de faciliter les mécanismes de neuroplasticité du cerveau (pour une synthèse, voir Masson, 2020). Néanmoins, la mise en application de ces principes et le choix des stratégies pédagogiques à privilégier au regard des connaissances en neuroéducation demeurent le fruit d'une réflexion complexe. Il apparaît en effet difficile de faire l'économie d'un processus rigoureux d'appropriation de ces principes, qui prend notamment en compte les caractéristiques de son milieu, de ses élèves ainsi que du contenu que l'on souhaite enseigner. Or, pour être en mesure de s'approprier ces principes et les mettre en application de manière efficace, il semble nécessaire d'en avoir une compréhension approfondie, surtout en ce qui a trait aux mécanismes cérébraux sous-jacents à chacun d'eux. Deux exemples sont ici discutés afin d'illustrer le défi associé à la mise en application possible des connaissances issues de la recherche en neuroéducation.

#### **Exemple 1 : Planifier les activités d'apprentissage**

Ce premier exemple s'intéresse à la mise en application des connaissances au regard de la neuroplasticité dans le contexte de la planification des activités d'apprentissage. À cet égard, il renvoie directement au modèle de Hebb (1949) évoqué précédemment pour expliquer par quel mécanisme se réalise la neuroplasticité. Selon ce modèle, les modifications qui se produisent au sein des connexions neuronales sont directement liées au fait d'activer les neurones (« Les neurones qui s'activent ensemble se connectent ensemble »). Plus précisément, pour que de nouvelles connexions neuronales s'établissent afin de réaliser un apprentissage particulier, les neurones associés à cet apprentissage doivent être suffisamment



activés, et ce, à de nombreuses reprises. Une stratégie pédagogique mise de l'avant dans la littérature consiste pour ce faire à planifier plusieurs moments d'activation (activation répétée), c'est-à-dire plusieurs activités au cours desquelles les élèves devront activer à de nombreuses reprises les neurones liés à l'apprentissage visé (Masson, 2020). Lors de cette planification, il importe de privilégier les activités d'apprentissage associées à une plus grande probabilité d'activation. En général, les activités qui demandent aux élèves de produire quelque chose (produire une réponse, une explication ou une démarche pour résoudre un problème, par exemple) sont plus susceptibles d'entraîner des activations que les approches plus passives comme l'écoute d'un enseignement magistral (Freeman *et al.*, 2014).

Néanmoins, ce principe d'activation répétée doit être appréhendé avec certaines nuances, car bien que les activations des neurones associés à un apprentissage soient essentielles à cet apprentissage, si ces activations sont répétées un trop grand nombre de fois dans un temps relativement court, le cerveau se désactive progressivement en raison d'un phénomène d'habituation (généralement appelé *repetition suppression* ; voir p. ex., Garrido *et al.*, 2009). Une étude de Callan et Schweighofer (2010) a ainsi démontré que si des apprenants réalisent quatre périodes d'exercices liés à un même objectif d'apprentissage les unes après les autres, le cerveau se désactive progressivement (diminution de l'activité cérébrale dans le temps). Cette désactivation doit être prise en compte lors de la planification des activités d'apprentissage, car elle peut faire en sorte que les apprenants perdent leur temps en travaillant, sans que cela ne mène à des changements au niveau des connexions neuronales. Un enseignant qui ne serait pas au fait de ce mécanisme de désactivation pourrait ainsi planifier une série

d'activations répétées, mais sans réfléchir à l'organisation temporelle de ces activations, ce qui ne serait possiblement pas aussi efficace pour l'apprentissage.

Pour contrer cet effet d'habituation, plusieurs études démontrent que lorsque les activations liées à un objectif d'apprentissage sont espacées dans le temps (c'est-à-dire, quand du temps s'écoule entre les activations), chaque activation est plus efficace pour consolider les connexions neuronales et l'apprentissage (Smolen *et al.*, 2016; Kornmeier, Sosic-Vasic, & Joos, 2022). En effet, le fait d'espacer les périodes d'apprentissage facilite considérablement l'apprentissage, notamment en termes de performance et de rétention de l'information (Kornell, 2009 ; Kim *et al.*, 2019). Cela s'expliquerait entre autres par le fait que l'espacement contribue au maintien de l'activité cérébrale (Callan et Schweighofer 2010). De surcroît, les mécanismes de neuroplasticité exigent un certain temps pour se mettre en place. Il s'agit en soi d'une contrainte cérébrale qui ne découle pas de l'architecture cérébrale initiale, mais plutôt des mécanismes biochimiques de plasticité et de consolidation des connexions cérébrales (Smolen *et al.*, 2016).

En espaçant les périodes associées à un même contenu d'apprentissage sur plusieurs jours, davantage de temps et de périodes de sommeil sont accordés au cerveau pour consolider les apprentissages et les connexions neuronales. Durant le sommeil, le cerveau réactive les réseaux de neurones liés aux apprentissages réalisés récemment (Antony, Gobel, O'Hare, Reber et Paller, 2012). Les neurones qui s'activent pendant le sommeil renforcent ainsi leurs interconnexions. Dormir permet donc de consolider les apprentissages par une réactivation spontanée et inconsciente des

réseaux de neurones en lien avec ces apprentissages.

Pour prendre en considération les bienfaits de l'espace des activations, une première stratégie peut consister à distribuer les périodes d'apprentissage dans le temps. Par exemple, au lieu de regrouper trois activités pédagogiques liées au même objectif d'apprentissage sur une seule période, ces activités peuvent être distribuées sur trois périodes différentes. De la même façon, au lieu d'étudier trois heures la veille d'un examen, il apparaît préférable d'étudier quatre fois 30 minutes les jours précédant l'examen. Une autre stratégie consiste à entrelacer les activités d'apprentissage en alternant les activités liées à différents objectifs d'apprentissage au cours d'une même période. Par exemple, au lieu de consacrer une heure à des activités liées uniquement à l'accord de l'adjectif suivi d'une autre heure d'activités liées à un autre objectif d'apprentissage, il serait préférable de diviser les deux heures en quatre blocs de 30 minutes et d'alterner les activités liées à chacun des objectifs d'apprentissage (objectif 1 → objectif 2 → objectif 1 → objectif 2). De cette façon, les activités d'apprentissage spécifiques à chacun des objectifs d'apprentissage seront davantage espacées (pour une discussion plus détaillée sur ces deux stratégies, voir Chen, Paas et Sweller, 2021).

En plus de cette réflexion concernant l'espace, un autre élément important doit aussi être considéré au regard du principe d'activation répétée et concerne le risque que cette répétition puisse contribuer à renforcer les erreurs des élèves. En effet, si à chacune des activations, des erreurs sont commises par l'élève (p. ex., s'il utilise une stratégie erronée pour résoudre un problème de mathématique), les réseaux de neurones

associés à cette erreur se consolideront progressivement, ce qui n'est pas souhaitable, car il deviendra alors de plus en plus difficile de ne pas commettre cette erreur. En plus de planifier des activations répétées, et de s'assurer que ces activations soient réparties dans le temps, il apparaît donc essentiel de veiller à ce que les élèves ne répètent pas une erreur. Pour ce faire, il serait préférable de ne pas leur soumettre une tâche trop complexe en début d'apprentissage. Il serait aussi souhaitable de les encourager à réduire la vitesse d'exécution d'une tâche afin de diminuer les risques d'erreurs et de chercher à maximiser les possibilités de rétroaction afin qu'ils réalisent le plus tôt possible si une erreur est commise et qu'ils puissent la corriger rapidement pour éviter de la répéter.

Ce premier exemple au regard de la planification met en évidence que plusieurs paramètres doivent être pris en considération dans la mise en application des résultats de recherche en neuroéducation. Bien que le principal général de l'activation répétée apparaisse primordial, sa mise en application nécessite une bonne appropriation et compréhension par l'enseignant des mécanismes cérébraux qui sous-tendent le principe.

### **Exemple 2 : Offrir de la rétroaction**

Ce deuxième exemple s'intéresse aux paramètres à considérer lorsqu'il est question d'offrir de la rétroaction aux élèves. Pour comprendre ces paramètres, il importe de considérer les effets de la rétroaction sur le plan cérébral, qui diffèrent selon le type de rétroaction donnée à l'élève. La rétroaction est généralement catégorisée en deux types : la rétroaction négative et la rétroaction positive. Alors que la rétroaction négative est un retour d'information indiquant qu'une erreur a été commise, la rétroaction positive est, à l'opposé, un retour d'information indiquant que

l'action ou la réponse produite est une réussite. Il a été démontré que la rétroaction négative contribue à l'activation des mécanismes cérébraux de correction d'erreur (Monchi *et al.*, 2001). Ces mécanismes, qui impliquent notamment la mobilisation de réseaux de neurones du cortex préfrontal, s'activent pour analyser la situation, pour détecter l'erreur et tenter d'éviter de la produire dans le futur. La rétroaction positive mène quant à elle à l'activation de la région cérébrale du striatum. Cette région fait partie du système de récompense du cerveau qui permet d'augmenter la quantité de dopamine dans le cerveau (Wilkinson *et al.*, 2014), une substance pouvant engendrer un état de bien-être et de satisfaction encourageant à reproduire la même action dans le futur. La rétroaction positive permet donc non seulement d'indiquer à l'élève qu'il réussit, mais elle peut également contribuer sa motivation : plus un élève vit des réussites, plus la quantité de dopamine sécrétée augmente et plus il est susceptible de poursuivre ses efforts pour apprendre et réussir à nouveau.

À la lumière de ces éléments, il semble donc important de chercher à maximiser la rétroaction offerte aux élèves, non seulement en leur indiquant leurs erreurs, mais également en leur mentionnant leurs bons coups et leur réussite. Étant donné les effets complémentaires de la rétroaction positive et de la rétroaction négative, il apparaît également important de non seulement viser un maximum de rétroactions, mais également viser un équilibre entre rétroactions positive et négative (Wilson *et al.*, 2019). Or, à cet égard, il a aussi été démontré que le cerveau pose certaines contraintes à l'apprentissage en raison de ses mécanismes de développement et de maturation. La maturation progressive du cortex préfrontal et des mécanismes cérébraux de correction d'erreur jusqu'au début de l'âge adulte est notamment associée

à une plus grande sensibilité du cerveau adulte, comparativement à celui de l'enfant, à la rétroaction négative. À l'inverse, le cortex préfrontal des enfants n'étant pas arrivé à maturité (Peters *et al.*, 2014), la rétroaction négative ne serait pas toujours suffisante et possiblement moins optimale. Ceux-ci tireraient potentiellement davantage profit de la rétroaction positive et de ses effets possibles sur la motivation à apprendre. Bien que les deux types de rétroaction demeurent nécessaires à tous les âges pour apprendre, il apparaît important de considérer que le fait de donner une rétroaction positive ou négative à l'apprenant n'aura pas le même impact sur le fonctionnement cérébral et l'apprentissage selon son âge (Van Duijvenvoorde *et al.*, 2008). Cette compréhension des mécanismes liés au développement cérébral peut donc avoir un impact sur la façon d'utiliser efficacement les types de rétroaction en vue de soutenir l'apprentissage.

En plus de chercher à maximiser la rétroaction et à l'adapter selon l'âge, un autre paramètre à considérer serait le moment optimal pour donner cette rétroaction. Des études (Hattie et Timperley, 2007; Van der Kleij *et al.*, 2015) montrent en effet que la rétroaction immédiate est généralement plus efficace qu'une rétroaction différée qui aurait lieu, par exemple, le lendemain ou quelques jours plus tard. Cependant, lorsque le risque d'erreur est peu élevé (lors d'exercices de consolidation des apprentissages, par exemple), l'efficacité de la rétroaction différée peut être supérieure, puisqu'elle comporte l'avantage, comparativement à la rétroaction immédiate, d'espacer les moments d'activation et d'éviter ainsi la désactivation du cerveau discutée dans l'exemple précédent. Autrement dit, une stratégie pédagogique reconnue efficace (la rétroaction immédiate) n'est pas nécessairement la stratégie la plus efficace dans tous les contextes et, sans la compréhension des mécanismes sous-

tendant son efficacité, il peut être difficile de faire les choix pédagogiques les plus susceptibles de favoriser la réussite des élèves. Par ailleurs, comme cela a été discuté précédemment, il est essentiel que le cerveau de l'élève demeure actif pour que ses connexions neuronales soient mobilisées et qu'il apprenne. Or, si la rétroaction immédiate n'est pas pertinente parce que la tâche est facile et qu'aucune erreur est commise, il est possible que le cerveau s'active peu lors de cette rétroaction et que le gain d'apprentissage soit minime. Il apparaît donc important que la rétroaction fournie à l'élève ne contrevienne pas au principe d'activation, essentiel à tout apprentissage. Pour que l'élève active les neurones associés à l'apprentissage ciblé, il demeure donc important que la tâche qu'il réalise présente un certain défi et qu'il ait besoin de fournir un effort pour l'accomplir.

Ce deuxième exemple concernant la rétroaction offerte aux élèves permet également de mettre en évidence que plusieurs paramètres sont à considérer afin d'orienter la façon de fournir cette rétroaction pour qu'elle soit la plus efficace possible, notamment l'âge des élèves, le moment de la rétroaction et le niveau de difficulté de la tâche à accomplir. Une bonne connaissance des effets de la rétroaction sur le plan cérébral apparaît ainsi pertinente pour mieux guider les stratégies pédagogiques employées par l'enseignant.

## CONCLUSION

La neuroéducation apporte un éclairage supplémentaire au domaine de l'éducation en renseignant sur les mécanismes cérébraux d'apprentissage ainsi que sur les effets de différentes stratégies pédagogiques sur le cerveau. Cet éclairage peut non seulement aider à mieux identifier les approches pédagogiques efficaces et les raisons

expliquant leur efficacité, mais également favoriser la mise en application des connaissances issues de la recherche. En particulier, une compréhension fine des mécanismes cérébraux d'apprentissage et des effets de différents paramètres sur ces derniers peut contribuer à une meilleure prise en compte du contexte et, conséquemment, à une mise en application plus efficace. Pour cette raison, il ne suffit pas de connaître ce qui fonctionne en général, mais il faut aussi savoir pourquoi ce qui fonctionne est susceptible de fonctionner, ou pas, et à quel point, dans le contexte dans lequel on se trouve. À cet égard, mieux comprendre les mécanismes cérébraux d'apprentissage peut faciliter la mise en application des connaissances issues de la recherche par les enseignants et contribuer à la réussite scolaire des élèves.

## Références

- Allaire-Duquette, G., Brault Foisy, L. M., Potvin, P., Riopel, M., Larose, M., & Masson, S. (2021). An fMRI study of scientists with a Ph. D. in physics confronted with naive ideas in science. *NPJ science of learning*, 6(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00091-x>
- Ansari, D., De Smedt, B. et Grabner, R. H. (2012). Neuroeducation – A critical overview of an emerging field. *Neuroethics*, 5(2), 105-117. <https://doi.org/10.1007/s12152-011-9119-3>
- Antony, J. W., Gobel, E. W., O'hare, J. K., Reber, P. J. et Paller, K. A. (2012). Cued memory reactivation during sleep influences skill learning. *Nature neuroscience*, 15(8), 1114. <https://doi.org/10.1038/nn.3152>
- Battro, A. M. et Cardinali, D. P. (1996). *Más cerebro en la educación* [More brain in education] [Electronic version]. La Nación.

- Récupéré de *brain* (p. 133-157). Cambridge, Massachusetts : MIT Press.  
<http://catamarcaemprende.com/wp-content/uploads/2008/03/cereln.pdf>
- Battro, A. M., Fischer, K. W. et Léna, P. J. (dir.). (2010). *The educated brain: Essays in neuroeducation*. Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511489907>
- Berlucchi, G. et Buchtel, H. A. (2009). Neuronal plasticity: historical roots and evolution of meaning. *Experimental Brain Research*, 192(3), 307-319.  
<https://doi.org/10.1007/s00221-008-1611-6>
- Brault Foisy, L.-M., Masson, S., Potvin, P. et Riopel, M. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics?, *Trends in Neuroscience and Education*, 4, 26-36.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tine.2015.03.001>
- Callan, D. E. et Schweighofer, N. (2010). Neural correlates of the spacing effect in explicit verbal semantic encoding support the deficient-processing theory. *Human Brain Mapping*, 31(4), 645-659.  
<https://doi.org/10.1002/hbm.20894>
- Carey, S. (2000). Science education as conceptual change. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(1), 13-19.  
[https://doi.org/10.1016/S0193-3973\(99\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0193-3973(99)00046-5)
- Chen, O., Paas, F., & Sweller, J. (2021). Spacing and interleaving effects require distinct theoretical bases: a systematic review testing the cognitive load and discriminative-contrast hypotheses. *Educational Psychology Review*, 33(4), 1499-1522.  
<https://doi.org/10.1007/s10648-021-09613-w>
- Dehaene, S. (2005). Evolution of human cortical circuits for reading and arithmetic: The “neuronal recycling” hypothesis. Dans S. Dehaene, J. R. Duhamel, M. Hauser et G. Rizzolatti (dir.), *From monkey brain to human*
- Dehaene, S. (2008). Cerebral constraints in reading and arithmetic: Education as a “neuronal recycling” process. Dans A. M. Battro, K. W. Fischer et P. J. Léna (dir.), *The educated brain: Essays in neuroeducation* (p. 232-247). Cambridge : Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511489907.016>
- Dehaene, S. et Cohen, L. (2007). Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*, 56(2), 384-398.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.004>
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Filho, G. N., Jobert, A., ... Cohen, L. (2010). How Learning to Read Changes the Cortical Networks for Vision and Language. *Science*, 330(6009), 1359-1364.  
<https://doi.org/10.1126/science.1194140>
- Delazer, M., Ischebeck, A., Domahs, F., Zamarian, L., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C. M., ... Felber, S. (2005). Learning by strategies and learning by drill — evidence from an fMRI study. *Neuroimage*, 25(3), 838-849.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.009>
- Fischer, K. W. (2009). Mind, brain, and education: building a scientific groundwork for learning and teaching1. *Mind, Brain, and Education*, 3(1), 3-16.  
<https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2008.01048.x>
- Fischer, K. W., Daniel, D. B., Immordino-Yang, M. H., Stern, E., Battro, A. et Koizumi, H. (2007). Why mind, brain, and education? Why now? *Mind, Brain, and Education*, 1(1), 1-2.  
<https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2007.00006.x>



Fischer, K. W., Goswami, U., Geake, J. et al. The Task Force on the Future of Educational Neuroscience (2010). The future of educational neuroscience. *Mind, Brain, and Education*, 4 (2), 68-80.  
<https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2010.01086.x>

Forman, S. G. (2015). *Implementation of mental health programs in schools: A change agent's guide*. Washington, DC: American Psychological Association Books.  
<https://doi.org/10.1037/14597-007>

Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H. et al. Wenderoth, M. P. (2014, Jun 10). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(23), 8410-8415.:  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>

Garrido, M. I., Kilner, J. M., Kiebel, S. J., Stephan, K. E., Baldeweg, T., & Friston, K. J. (2009). Repetition suppression and plasticity in the human brain. *Neuroimage*, 48(1), 269-279.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.06.034>

Geake, J. (2009). *The Brain At School: Educational Neuroscience In The Classroom*. McGraw-Hill Education (UK).

Geake, J. et Cooper, P. (2003). Cognitive Neuroscience: implications for education? *Westminster Studies in Education*, 26(1), 7-20.  
<https://doi.org/10.1080/0140672030260102>

Goswami, U. (2006). Neuroscience and education: from research to practice? *Nature reviews neuroscience*, 7(5), 406.  
<https://doi.org/10.1038/nrn1907>

Goswami, U. (2008). Principles of learning, implications for teaching: A cognitive neuroscience perspective. *Journal of Philosophy of Education*, 42(3-4), 381- 399.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9752.2008.00639.x>

Hattie, J. (2013). *Visible learning: A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement*. Abingdon : Routledge. ISBN 0-203-88733-6 Master e-book ISBN

Hattie, J. (2015). The applicability of Visible Learning to higher education. *Scholarship of Teaching and Learning in Psychology*, 1(1), 79. <https://doi.org/10.1037/stl0000021>

Hattie, J. et Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81-112.  
<https://doi.org/10.3102/003465430298487>

Hebb, D.O. (1949). *The organization of behaviour: A neuropsychological theory*. New-York : Wiley.

Houdé, O. (2014). *Apprendre à résister*. Paris : Le Pommier.

Houdé, O., Kayser, D., Koenig, O., Proust, J. et Rastier, F. (dir.). (2004). *Dictionary of cognitive science: neuroscience, psychology, artificial intelligence, linguistics, and philosophy*. New-York : Routledge.

Houdé, O., Zago, L., Crivello, F., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B. et Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: Evidence from a training paradigm. *NeuroImage*, 14, 1486-1492. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0930>

Kim, A. S. N., Wong-Kee-You, A. M. B., Wiseheart, M., & Rosenbaum, R. S. (2019). The spacing effect stands up to big data. *Behavior Research Methods*, 51(4),

1485-1497. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1184-7>

Kornell, N. (2009). Optimising learning using flashcards: Spacing is more effective than cramming. *Applied Cognitive Psychology*, 23(9), 1297-1317. <https://doi.org/10.1002/acp.1537>

Kornmeier, J., Susic-Vasic, Z., & Joos, E. (2022). Spacing Learning Units affects both learning and forgetting. *Trends in Neuroscience and Education*, 100173. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2022.100173>

Kwok, V., Niu, Z., Kay, P., Zhou, K., Mo, L., Jin, Z., ... Tan, L. H. (2011). Learning new color names produces rapid increase in gray matter in the intact adult human cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(16), 6686-6688. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103217108>

Liu, X. (2001). Synthesizing research on student conceptions in science. *International Journal of Science Education*, 23, 55-81. <https://doi.org/10.1080/09500690119778>

Masson, S. (2012). Neuroeducation: Understanding the brain to improve teaching. *Neuroeducation*, 1(1), 1-2.

Masson, S. (2015). Les apports de la neuroéducation à l'enseignement: des neuromythes aux découvertes actuelles. *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 134, 11-22.

Masson, S. (2014). Cerveau, apprentissage et enseignement: mieux connaître le cerveau peut-il nous aider à mieux enseigner. *Éducation Canada*, 54(4), 40-43.

Masson, S. (2020). *Activer ses neurones: pour mieux apprendre et enseigner*. Odile Jacob.

Masson, S. et Brault Foisy, L. M. (2014). Fundamental concepts bridging education and

the brain. *McGill Journal of Education*, 49(2), 501-512. <https://doi.org/10.7202/1029432ar>

Masson, S., Potvin, P., Riopel, M. et Brault Foisy, L.-M. (2014). Differences in brain activation between novices and experts in science during a task involving a common misconception in electricity. *Mind, Brain, and Education*, 8(1), 37-48. <https://doi.org/10.1111/mbe.12043>

McCandliss, B. D. (2010). Educational neuroscience: The early years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(18), 8049-8050. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003431107>

Mesibov, G. B., & Shea, V. (2011). Evidence-based practices and autism. *Autism*, 15(1), 114-133. <https://doi.org/10.1177/1362361309348070>

Monchi, O., Petrides, M., Petre, V., Worsley, K., et Dagher, A. (2001). Wisconsin Card Sorting revisited: distinct neural circuits participating in different stages of the task identified by event-related functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, 21(19), 7733-7741. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.21-19-07733.2001>

Newton, P. M. (2015). The learning styles myth is thriving in higher education. *Frontiers in Psychology*, 6, 1908. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01908>

OCDE (2007). Comprendre le cerveau : naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage. Paris: Éditions de l'OCDE.

Peters, S., Braams, B. R., Raijmakers, M. E., Koolschijn, P. C. M., & Crone, E. A. (2014). The neural coding of feedback learning across child and adolescent development. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(8), 1705-1720. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00594](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00594)

- Potvin, P., Masson, S., Lafortune, S. et Cyr, G. (2014). Persistence of the intuitive conception that heavier objects sink more: A reaction time study with different levels of interference. *International Journal of Science and Mathematics Education*.  
<https://doi.org/10.1007/s10763-014-9520-6>
- Reddy, L. A., Forman, S. G., Stoiber, K. C. et Gonzalez, J. E. (2017). A national investigation of school psychology trainers' attitudes and beliefs about evidence-based practices. *Psychology in the Schools*, 54(3), 261-278.  
<https://doi.org/10.1002/pits.21999>
- Pascual-Leone, A., Amedi, A., Fregni, F. et Merabet, L. B. (2005). The plastic human brain cortex. *Annual Review Neuroscience*, 28, 377-401.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144216>
- Pasquinelli, E. (2011). Knowledge-and evidence-based education: Reasons, trends, and contents. *Mind, Brain, and Education*, 5(4), 186-195.  
<https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2011.01128.x>
- Pasquinelli, E. (2015). Améliorer le dialogue entre les sciences cognitives et l'éducation en s'inspirant des relations entre la recherche fondamentale et la médecine clinique. *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 134, 23-30
- Potvin, P. (2013). Proposition for improving the classical models of conceptual change based on neuroeducational evidence: conceptual prevalence. *Neuroéducation*, 2(1), 16-43.  
<https://doi.org/10.24046/neuroed.20130201.16>
- Royal Society (2011). *Neuroscience: Implications for education and lifelong learning*. London : The Royal Society.
- Simpson, R. (2005). Evidence-based practice in developmental disabilities: What is it and why does it matter? *Journal on Developmental Disabilities*, 12, 167-171.
- Slavin, R. E. (2002). Evidence-based education policies: Transforming educational practice and research. *Educational researcher*, 31(7), 15-21.  
<https://doi.org/10.3102/0013189X031007015>
- Smolen, P., Zhang, Y. et Byrne, J. H. (2016). The right time to learn: mechanisms and optimization of spaced learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(2), 77.  
<https://doi.org/10.1038/nrn.2015.18>
- Spitzer, M. (2012). Education and neuroscience. *Trends in Neuroscience and Education*, 1(1), 1-2.  
<https://doi.org/10.1016/j.tine.2012.09.002>
- Stephenson, J. (2009). Best practice? Advice provided to teachers about the use of Brain Gym in Australian schools. *Australian Journal of Education*, 53(2), 109-124.  
<https://research.acer.edu.au/aje/vol53/iss2/1>
- Van der Kleij, F. M., Feskens, R. C. W. et Eggen, T. J. H. M. (2015). Effects of Feedback in a Computer-Based Learning Environment on Students' Learning Outcomes. *Review of Educational Research*, 85(4), 475-511.  
<https://doi.org/10.3102/0034654314564881>
- Van Duijvenvoorde, A. C., Zanolie, K., Rombouts, S. A., Raijmakers, M. E. et Crone, E. A. (2008). Evaluating the negative or valuing the positive? Neural mechanisms supporting feedback-based learning across development. *Journal of Neuroscience*, 28(38), 9495-9503.  
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1485-08.2008>
- Yoncheva, Y. N., Blau, V. C., Maurer, U. et McCandliss, B. D. (2010). Attentional focus during learning impacts N170 ERP responses

to an artificial script. *Developmental Neuropsychology*, 35(4), 423-445.  
<https://doi.org/10.1080/87565641.2010.480918>

Ward, J. (2010). *The student's guide to cognitive neuroscience: Second edition*. New York : Psychology Press.

Wilkinson, L., Tai, Y. F., Lin, C. S., Lagnado, D. A., Brooks, D. J., Piccini, P. et Jahanshahi, M. (2014, Oct). Probabilistic classification learning with corrective feedback is associated with in vivo striatal dopamine release in the ventral striatum, while learning without feedback is not. *Hum Brain Mapp*, 35(10), 5106-5115.  
<https://doi.org/10.1002/hbm.22536>

Willingham, D. (2013, 26 mars). *A New Push for Science in Education in Britain*. [Billet de blogue]. Récupéré de <http://www.danielwillingham.com/daniel-willingham-science-and-education-blog/category/teaching>

Wilson, R. C., Shenhav, A., Straccia, M. et Cohen, J. D. (2019). The eighty five percent rule for optimal learning. *Nature Communications*, 10(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12552-4>