CHAPITRE 9

Utilisation de l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel en sciences¹

Steve Masson, Université du Québec à Montréal Patrice Potvin, Université du Québec à Montréal Martin Riopel, Université du Québec à Montréal

RÉSUMÉ

Grâce à de récentes techniques d'imagerie cérébrale dont l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, il est aujourd'hui possible d'analyser la façon dont le cerveau des élèves travaille pour accomplir des tâches scolaires telles que lire, écrire, compter et même résoudre des problèmes d'ordre scientifique. Encore peu connues dans le domaine de l'éducation, ces techniques offrent pourtant d'intéres-

La rédaction de ce chapitre a été soutenue par une bourse ainsi que par des subventions du Conseil de recherche en sciences humaines du Canada.

santes perspectives de recherche. En prenant appui sur une étude en cours portant sur les mécanismes cérébraux sous-tendant l'apprentissage des sciences, nous présenterons les avantages, les démarches et les contraintes liés à l'utilisation de l'imagerie cérébrale pour l'étude des processus du changement conceptuel.

INTRODUCTION

epuis quelques années, un nombre grandissant de chercheurs en éducation (Geake, 2003, 2004; Geake et Cooper, 2003; Goswami, 2004, 2006) et en neuroscience cognitive (Houdé, 2006; O'Boyle et Gill, 1998; Pettito et Dunbar, 2004) encouragent le développement d'une approche neuroscientifique de recherche en éducation dans un nombre croissant de publications. Ainsi, en 1999, l'OCDE lançait un projet novateur menant à la publication, en 2007. de l'ouvrage Comprendre le cerveau : naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage dans lequel l'OCDE se montre clairement en faveur d'une telle approche : « La neuroscience de l'éducation débouche sur des connaissances précieuses et neuves, qui permettent d'informer politiques et pratiques éducatives » (p. 18). Puis, en 2007, le premier numéro de la revue Mind, Brain, and Education est publié. Il s'agit d'une revue dédiée à la recherche en éducation reposant sur une approche neuroscientifique qui a gagné le prix de la Meilleure Nouvelle Revue en sciences humaines par l'Association of American Publishers. En 2007 également, la première conférence de l'International Mind, Brain and Education Society (IMBES) a eu lieu au Texas et a réuni des chercheurs en neuroéducation. Finalement, en 2008, un ouvrage intitulé The Educated Brain: Essays in Neuroeducation est publié; il regroupe plusieurs textes portant sur les fondements épistémologiques et méthodologiques du champ de recherche en émergence qu'est la neuroéducation.

Bien que les travaux de recherche soient de plus en plus nombreux, il n'existe qu'un nombre très limité d'études (dont nous discuterons plus loin) abordant des problèmes liés à l'apprentissage et l'enseignement des sciences reposant sur une approche neuroscientifique. En prenant appui sur la problématique et sur les cadres théorique et méthodologique d'une étude en cours sur l'étude des mécanismes cérébraux liés aux processus du changement conceptuel en physique à l'aide de l'imagerie cérébrale par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), ce texte discute de la pertinence d'utiliser l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel en

physique, ainsi que des démarches et contraintes liées à l'utilisation de ce type de technologie.

POURQUOI UTILISER L'IMAGERIE CÉRÉBRALE 1. POUR L'ÉTUDE DU CHANGEMENT CONCEPTUEL?

La pertinence d'utiliser l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel repose principalement sur deux arguments. Le premier est que l'imagerie cérébrale permet d'étudier les processus du changement conceptuel au niveau cérébral, ce qui peut à la fois stimuler de nouvelles hypothèses de recherche et vérifier les hypothèses existantes. Le deuxième argument – qui est en fait une illustration en appui au premier - est qu'il existe déjà des études neuroscientifiques portant sur l'étude du changement conceptuel et qui non seulement sont intéressantes, mais ouvrent de plus la voie à une vision totalement nouvelle des processus de changement conceptuel, dont le concept central est celui d'inhibition. Les deux prochaines sous-sections discutent de ces deux arguments.

1.1. Parce que l'imagerie cérébrale permet d'obtenir des données de recherche à un niveau d'analyse encore inexploré

L'apprentissage des sciences est percu par les élèves (et souvent par les enseignants) comme un processus difficile et exigeant. La plupart du temps, cette difficulté est attribuée au fait que les sciences reposent sur des concepts abstraits (diSessa, 2006) qui exigent l'utilisation d'outils mathématiques complexes. À la fin des années 1970 et au début des années 1980, des chercheurs en didactique des sciences (par exemple, McCloskey, 1983; Viennot, 1979) ont proposé une hypothèse nouvelle concernant l'origine des difficultés en sciences. Selon ces chercheurs, l'apprentissage des sciences serait difficile, non pas parce qu'il repose sur un processus abstrait impliquant des habiletés particulières en mathématiques, mais parce que les élèves et les gens en général entretiennent, avant même leur premier cours de sciences, des conceptions spontanées en opposition avec les connaissances scientifiquement admises et qui viennent interférer avec l'apprentissage des sciences.

L'importance des conceptions erronées ou inappropriées des élèves dans l'apprentissage des sciences est aujourd'hui appuyée par un vaste travail de recherche incluant d'excellentes revues (Confrey, 1990; Legendre, 2002; Wandersee, Mintzes et Novak. 1994), des répertoires très complets de dizaines de conceptions inappropriées courantes dans la plupart des domaines scientifiques (Thouin, 1996), et des bibliographies contenant des références à plusieurs milliers d'articles de recherche sur les conceptions des élèves (Duit, 2007). En fait, les conceptions inappropriées des élèves ont fait l'objet, au cours des dernières décennies, d'un effort de recherche sans précédent dans l'histoire récente de la recherche en didactique des sciences. Cet effort est justifié non seulement parce que ces conceptions inappropriées sont fréquentes, mais également parce qu'elles sont particulièrement difficiles à faire évoluer, ce qui cause un obstacle fondamental à l'enseignement des sciences : celui de la persistance des conceptions inappropriées des élèves. Cette persistance est si forte que les conceptions inappropriées perdurent même après plusieurs cours de sciences. Par exemple, malgré des études approfondies en électricité, plus de 10 % des étudiants de deuxième année en ingénierie continuent à croire qu'un seul fil est nécessaire pour qu'une ampoule s'allume (Periago et Bohigas, 2005). Cette situation n'est pas propre à l'apprentissage de l'électricité. puisque plus de 25 % des étudiants de première année du baccalauréat en physique continuent à croire dans la conception inappropriée selon laquelle une balle de métal de la même grosseur qu'une balle en plastique tombera plus rapidement au sol (Wandersee et coll., 1994).

Parallèlement aux études sur l'identification des conceptions des élèves, des chercheurs ont tenté de comprendre les processus par lesquels un individu doit passer pour réaliser un changement conceptuel, c'est-à-dire réussir le passage d'une conception inappropriée à une conception plus appropriée du point de vue de la science. L'un des premiers modèles du changement conceptuel – et l'un des plus cités dans la littérature de recherche du domaine – est celui de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982). Ce modèle, inspiré de Piaget (1967) et de Kuhn (1962), suggère que le passage d'une conception inappropriée à une conception plus appropriée dépend de différentes conditions: (1) il doit y avoir insatisfaction par rapport aux conceptions existantes, (2) la nouvelle conception doit être intelligible, (3) elle doit être plausible, et (4) elle doit être fertile, c'est-à-dire elle doit donner la possibilité de trouver de nouvelles solutions à de nouveaux problèmes.

Bien que le plus cité, le modèle de Posner et coll. (1982) est loin de faire l'unanimité. En fait, il existe de nombreux modèles du changement conceptuel. Par exemple, le modèle de Duit et Treagust (2003) postule que les conceptions des élèves se situent à l'intérieur d'une structure conceptuelle. Ainsi, ce qui doit évoluer au cours du changement conceptuel, ce n'est pas simplement la conception, mais également la structure conceptuelle qui la sous-tend et la soutient. Pour Vosniadou (1994), il est important de situer la notion de changement conceptuel à un autre niveau que celui des concepts, parce que les conceptions, les structures conceptuelles et les concepts sont intégrés à une structure théorique plus grande qui les contraint. Ces grandes structures formant un « cadre théorique naïf » ne sont pas constituées de concepts - comme c'est le cas pour la notion de structure conceptuelle de Duit & Treagust (2003) – mais de présuppositions ontologiques et épistémologiques élaborées au cours de la petite enfance. Contrairement à Vosniadou, diSessa (1993) pense pour sa part que les réponses non scientifiques formulées par les élèves ne découlent pas nécessairement de théories naïves, mais qu'elles proviennent plutôt d'une utilisation inadéquate de règles ou d'outils cognitifs intuitifs et sous-conceptuels qu'on appelle les primitives phénoménologiques (p-prims). Au cours des processus de changement conceptuel, l'utilisation que fait l'apprenant d'une p-prim ou d'un ensemble de p-prims évolue parce que l'élève développe progressivement, selon diSessa (1998), des classes de coordination, c'est-à-dire des systèmes complexes de connaissances comportant plusieurs parties coordonnées incluant les p-prims (diSessa, 2006). Selon ce point de vue, le changement conceptuel est un processus par lequel un individu passe d'une utilisation intuitive de p-prims à leur utilisation systématique, qui est sous-tendue par tous les éléments organisés d'une classe de coordination ; cela revient à dire, en résumé, que le changement conceptuel est un processus par lequel l'individu développe une classe de coordination conforme au savoir scientifique. Mentionnons que de nombreux autres modèles existent, dont ceux de Chi (1992), de Pintrich (1993) et de Stavy et Tirosh (2000). Le nombre de modèles proposés, de même que le volume important d'articles sur le changement conceptuel, témoignent d'une part de l'importance de ce type de recherche sur la scène internationale et, d'autre part, de l'ampleur du travail de recherche qu'il reste à accomplir.

Il existe donc une variété de modèles hypothétiques du changement conceptuel et, bien que certains soient susceptibles de s'enrichir mutuellement, il arrive souvent, comme nous l'avons lu au paragraphe précédent, que les modèles proposés par différents chercheurs reposent sur des bases théoriques fondamentalement opposées. L'existence de cette variété de modèles hypothétiques et souvent contradictoires démontre toute la complexité des processus mentaux impliqués dans le changement conceptuel et explique pourquoi, malgré les efforts soutenus des chercheurs, les processus fondamentaux liés au changement conceptuel demeurent encore très mal connus:

Il n'existe aucune théorie testée et bien articulée du changement conceptuel à laquelle un nombre important de chercheurs adhèrent. En fait, les études du domaine reposent sur différentes perspectives qui combinent de façon kaléidoscopique des idées théoriques et beaucoup de sens commun (diSessa, 2006, traduction libre, p. 266).

Ainsi, pour faire avancer significativement les connaissances actuelles dans le domaine du changement conceptuel et pour porter un regard neuf sur ces modèles, il nous semble essentiel de développer davantage la base de connaissances empiriques du domaine en utilisant des techniques et des méthodologies nouvelles.

L'une des façons les plus prometteuses et les plus originales de contribuer au développement de cette base de résultats empiriques de recherche est d'avoir recours aux récentes techniques d'imagerie cérébrale. Utilisée pour la première fois au début des années 1990 en psychologie (Ogawa et coll., 1992; Kwong et coll., 1992), l'imagerie cérébrale permet de mesurer l'activité cérébrale de différentes régions du cerveau au cours de la réalisation de tâches cognitives telles que lire, compter et même résoudre des problèmes d'ordre scientifique (Masson, 2007). Puisque nous connaissons de mieux en mieux les fonctions cognitives des différentes régions cérébrales grâce à la neuroscience cognitive (Gazzaniga, 2004; Houdé, Mazoyer et Tzourio-Mazoyer, 2001), il est possible de mieux comprendre la nature des ressources cognitives qui doivent être mobilisées lors de la résolution de problèmes d'ordre scientifique. Il est donc possible depuis peu d'analyser les processus du changement conceptuel au niveau cérébral en étudiant, durant l'activité cérébrale, les modifications liées à la réalisation d'un changement conceptuel (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Nelson, Lizcano, Atkins et Dunbar, 2007). Ces études de neuro-imagerie portant sur le changement conceptuel nous semblent particulièrement intéressantes, parce qu'elles apportent des informations sur une variable

qui n'a jamais été mesurée jusqu'à présent : l'activité cérébrale. Ces informations, combinées à celles provenant d'autres types de recherche, peuvent contribuer à construire des modèles du changement conceptuel plus complets.

Cet intérêt pour l'utilisation de la neuro-imagerie en éducation est soutenu par un nombre croissant de chercheurs, tant dans le domaine de l'éducation que dans celui de la neuroscience cognitive. Selon ces chercheurs, un des principaux avantages à utiliser l'imagerie cérébrale est de rendre possible l'étude de certains problèmes éducatifs (dont ceux liés au changement conceptuel) à un niveau d'analyse jusqu'ici inexploré, c'est-à-dire au niveau cérébral (Geake et Cooper, 2003; Dunbar et coll., 2007). L'acces à ce nouveau niveau d'analyse comporte des avantages certains pour la recherche. Par exemple, il stimule la formulation d'hypothèses inédites sur la nature des processus en jeu dans la réalisation de tâches scolaires et peut aider les chercheurs à choisir parmi différents modèles cognitifs en compétition, puisque l'imagerie cérébrale permet d'obtenir de l'information des contraintes imposées par le cerveau sur les processus cognitifs. De plus, selon Goswami (2004), l'imagerie cérébrale permet de connaître l'effet d'une intervention pédagogique sur le cerveau, en plus d'aider à diagnostiquer les enfants présentant des difficultés d'apprentissage.

1.2. Parce que les premiers résultats de recherche mènent à des interprétations inédites de la nature des processus de changement conceptuel

Les avantages de l'utilisation de l'imagerie cérébrale prennent forme à travers trois études récentes. Dans la première, Fugelsang et Dunbar (2005) ont étudié, à l'aide de l'IRMf, ce qui arrive au niveau cérébral lorsqu'on présente des informations (ou données) qui sont en opposition ou en accord avec les conceptions des individus concernant l'efficacité d'un médicament pour lutter contre la dépression. La présentation d'informations contredisant les conceptions des participants place ces derniers dans une situation de conflit cognitif équivalente à celle que pourrait provoquer la collecte des données inattendues dans un contexte scolaire d'expérimentation scientifique. Les informations sont présentées sous la forme d'images montrant une pilule à côté d'un bonhomme souriant (médicament efficace) ou déprimé (médicament inefficace). Les informations sont présentées l'une à la suite de l'autre par blocs contenant plus ou

moins de bonshommes souriants, ce qui permet d'obtenir des données globalement en accord ou en désaccord avec les conceptions des participants. Après la présentation du bloc d'informations, les participants doivent évaluer l'efficacité du médicament sur une échelle de 1 (basse) à 3 (élevée).

Ils ont découvert que l'hippocampe, une région du cerveau associée à l'apprentissage et à la mémoire (par exemple, Poldrack, Clark, Pare-Blagoev, Shohamy, Creso Moyano, Myers et coll., 2002), est plus activé lors de la présentation d'informations en accord avec les conceptions des participants que lors de la présentation d'informations en désaccord. Cela pourrait signifier que les individus intègrent plus efficacement les informations présentées lorsque ces dernières sont en accord avec leurs conceptions. Ils ont également découvert que le cortex cingulaire antérieur associé à la détection de conflit (Botvinick, 2007), le cortex préfrontal dorsolatéral gauche lié à l'inhibition (Goel et Dolan, 2003) et le précuneus lié au transfert de ressources attentionnelles (Mazoyer, Wicker et Fonlupt, 2002) sont plus activés lors de la présentation d'informations qui s'opposent aux conceptions des individus que lors de la présentation d'informations qui y concordent.

Ces découvertes suggèrent que le cerveau détecte d'abord, à l'aide du cortex cingulaire antérieur, l'existence d'un conflit entre la conception sur l'efficacité du médicament et les données présentées. Ensuite, au lieu d'activer des régions cérébrales liées à l'apprentissage comme l'hippocampe, le cerveau, en ayant recours au cortex préfrontal dorsolatéral, met fin à l'attention requise par la tâche, comme si les données étaient sans intérêt puisqu'erronées. Finalement, le cerveau active le précunéus pour détourner son attention de la tâche. Selon Dunbar et coll. (2007), cela montre clairement qu'une stratégie pédagogique axée uniquement sur le conflit cognitif, c'est-à-dire sur la présentation de données incompatibles avec les conceptions des individus, ne produira pas de changement conceptuel, puisque les participants à l'étude semblent traiter les informations reçues comme si elles étaient erronées et sans intérêt plutôt qu'intéressantes et pouvant susciter des apprentissages.

Dans la deuxième étude, Dunbar et ses collaborateurs (Dunbar et coll., 2007; Pettito et Dunbar, 2004) ont tenté d'explorer les mécanismes cérébraux qui sous-tendent les processus du changement conceptuel en physique mécanique. Pour ce faire, ils ont com-

paré l'activité cérébrale de deux groupes. Un premier groupe est formé d'étudiants universitaires qui n'ont suivi aucun cours de sciences. Un second est formé d'étudiants universitaires avant suivi au moins cinq cours de physique. Les étudiants des deux groupes possèdent des moyennes universitaires comparables et la proportion d'hommes et de femmes y est identique. La tâche cognitive demandée aux participants consiste à appuyer sur un bouton pour dire si le film montrant deux balles qui tombent est conforme à ce qui arriverait dans un environnement sans frottement (voir tableau 1). On présente aux participants des films naïfs (c'est-à-dire conformes aux conceptions des novices : la balle la plus grosse tombe plus vite), des films scientifiques (c'est-à-dire conformes aux conceptions des experts : la balle la plus grosse tombe à la même vitesse que la plus petite) et des films de contrôle (c'est-à-dire en contradiction avec les conceptions des individus des deux groupes : la balle la plus petite tombe plus rapidement).

L'un des résultats les plus intéressants de cette étude est que les étudiants novices en physique ayant répondu de façon scientifique à la tâche présentée activent notamment leur cortex cingulaire antérieur (lié à la détection de conflits) malgré le fait que les participants affirment ne pas percevoir de conflits entre leurs conceptions et les informations présentées. Selon Dunbar et coll. (2007), cela pourrait signifier que les novices n'ont pas réalisé un profond changement conceptuel, mais arrivent à inhiber leurs réponses inappropriées. Cette idée d'inhibition est particulièrement intéressante, parce qu'elle remet en question la représentation habituelle des chercheurs en matière de processus du changement conceptuel, représentation qui consiste souvent à effacer ou à restructurer en profondeur les connaissances antérieures. Elle pave aussi la voie à une nouvelle facon de concevoir l'apprentissage des sciences.

Plusieurs théoriciens du domaine de l'éducation voient la réorganisation conceptuelle comme le but principal de l'éducation, et considèrent le changement conceptuel d'une façon telle que les élèves ne seront plus capables de conceptualiser leurs anciennes théories après un changement conceptuel (la notion d'incommensurabilité de Kuhn). Cependant, les résultats des expériences rapportées dans ce chapitre indiquent que, même quand le changement conceptuel semble avoir eu lieu, les élèves ont encore accès à leurs anciennes théories naïves, et ces théories semblent avoir été activement inhibées plutôt que réorganisées et absorbées dans une nouvelle théorie. (Dunbar et coll., 2007, traduction libre, p. 8)

TABLEAU 1

(les stimuli sont des films et le tableau ne présente que les première et dernière images) Stimulus de contrôle e Exemples de tâche cognitive en mécanique Stimulus naif o Stimulus scientifique Dernière image du film Première image du film

Dans une troisième étude portant cette fois sur les mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en chimie (plus précisément, concernant les changements de phase de la matière). Nelson et coll. (2007) ont demandé à des novices (n'avant suivi aucun cours autre que celui de chimie générale au secondaire et n'avant pas suivi de cours de chimie depuis au moins deux ans) et à des experts (ayant suivi au moins quatre cours de chimie) d'indiquer si une image montrant des molécules représente bien ce qui arrive aux molécules d'un liquide après son évaporation. Comme en mécanique, la tâche est composée de stimuli scientifiques, de stimuli naïfs et de stimuli de contrôle.

Ces chercheurs ont observé que les experts activent davantage le cortex préfrontal, alors que les novices sollicitent davantage des régions du lobe temporal inférieur et du lobe occipital. Ces résultats s'accordent avec les résultats obtenus par Houdé et coll. (2000) concernant le raisonnement logique. À l'instar de Houdé et coll. (2000), Nelson et coll. (2007) observent que, pour réussir la tâche, les participants doivent inhiber leur stratégie spontanée et inappropriée s'appuyant seulement sur des informations superficielles au profit d'une stratégie plus complexe impliquant des mécanismes d'inhibition et de contrôle cognitif qui mobilisent des fonctions cognitives de haut niveau situées dans le cortex préfrontal.

Ces trois études ont des implications considérables sur la recherche portant sur les processus du changement conceptuel. La première remet en question l'efficacité de l'utilisation de stratégies pédagogiques strictement basées sur le conflit cognitif. La seconde conteste l'idée fondamentale selon laquelle le changement conceptuel implique une éradication ou une restructuration majeure des connaissances antérieures et propose d'inclure, dans notre interprétation des processus du changement conceptuel, le concept d'inhibition. La troisième fournit les premiers éléments d'un modèle qui expliquerait de quelle façon les connaissances antérieures peuvent être inhibées grâce à un meilleur contrôle cognitif. Sans l'utilisation de la neuro-imagerie, aucune de ces découvertes n'aurait vu le jour.

2. COMMENT UTILISER L'IMAGERIE CÉRÉBRALE POUR L'ÉTUDE DU CHANGEMENT CONCEPTUEL ?

Après avoir traité de la pertinence d'utiliser l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel, nous présentons maintenant les différentes étapes et contraintes liées à la réalisation d'un projet de recherche impliquant la neuro-imagerie. Pour illustrer notre propos, nous donnons l'exemple d'une étude en cours les mécanismes cérébraux qui sous-tendent le processus du changement conceptuel en physique à l'aide de l'IRMf.

2.1. En définissant des hypothèses de recherche opérationnelles

Dans un projet de neuro-imagerie, les hypothèses de recherche jouent un rôle central. Elles doivent à la fois s'appuyer sur les connaissances existantes quant au fonctionnement du cerveau et s'avérer suffisamment opérationnelles pour rendre possible l'analyse des données. En général, une hypothèse prendra la forme : « Si la variable indépendante X augmente (ou diminue), alors l'activité de la région cérébrale Y devrait augmenter (ou diminuer). » (Huettel, Song et McCarthy, 2004).

Les hypothèses de la recherche en cours s'appuient sur des éléments des études antérieures discutées à la section précédente. Premièrement, à la fois dans l'étude de Fugelsang et Dunbar (2005) et dans celle de Dunbar, Fugelsang et Stein (2007), le cortex cingulaire antérieur, une région associée à la détection de conflits selon Botvinick (2007), est plus activé lorsqu'on présente des informations qui entrent en conflit avec les conceptions antérieures des participants. Deuxièmement, à la fois dans l'étude de Houdé et coll. (2000) et dans celle de Nelson et coll. (2007), on observe que les novices d'un domaine utilisent davantage des régions cérébrales associées à des stratégies perceptuelles, alors que les experts activent davantage des fonctions cognitives de haut niveau situées dans le lobe frontal. La théorie de Botvinick permet de lier ces deux résultats expérimentaux : l'activation du cortex cingulaire antérieur détecte les conflits qui signalent la nécessité d'utiliser des fonctions cognitives de haut niveau situées dans le cortex préfrontal.

Nous appuyant sur ces études, nous croyons que, pour réaliser un changement conceptuel, l'individu doit apprendre à inhiber ses réponses inappropriées en mettant plus à profit des régions cérébrales liées à la détection de conflits (cortex cingulaire antérieur) et au contrôle cognitif (régions du cortex préfrontal). Les hypothèses retenues sont donc les suivantes :

Hypothèse 1: Les novices activent davantage le cortex cingulaire antérieur et le cortex préfrontal après avoir subi un conflit cognitif.

Si vrai, alors l'inhibition et le contrôle cognitif pourraient jouer un rôle dans le processus de changement conceptuel.

Hypothèse 2 : Les experts activent davantage le cortex cingulaire antérieur et le cortex préfrontal que les novices :

Si vrai, alors l'inhibition et le contrôle cognitif jouent un rôle constant dans la formulation de réponses scientifiques.

2.2. En choisissant un échantillon de participants assez homogène et assez grand

Pour détecter des différences statistiquement significatives, il faut non seulement un nombre suffisant de sujets par groupe, mais il faut aussi que la variabilité cérébrale entre les sujets d'un groupe ne soit pas trop élevée. Pour réduire la variabilité entre les sujets d'un même groupe, il est nécessaire de déterminer des critères de sélection favorisant l'obtention d'un échantillon homogène.

Dans notre étude, les participants des deux groupes (experts et novices) sont des hommes droitiers âgés de 20 à 35. La cote R des études collégiales ainsi que la moyenne universitaire des deux groupes sont comparables d'un groupe à l'autre. Pour cette raison, les individus présentant une cote R ou une moyenne universitaire atypique, c'est-à-dire inférieure à 2,7 sur 4,3 ou supérieur à 4,0 sur 4,3 sont exclus de l'étude. Nos groupes de sujets sont formés de 15 personnes. Les 15 participants novices sont des étudiants de troisième année d'un baccalauréat non scientifique (par exemple, psychologie, administration) qui n'ont jamais suivi de cours optionnels en sciences durant leur parcours scolaire, et dont les réponses à un questionnaire montrent qu'ils adhèrent à des conceptions inappropriées. Les 15 participants experts sont des étudiants de troisième année d'un baccalauréat scientifique (par exemple, physique, chimie, génie) qui ont suivi un minimum de quatre cours universitaires en physique mécanique et en électricité, et dont les réponses au questionnaire montrent qu'ils possèdent des conceptions appropriées. Plus l'écart d'expertise est grand entre novices et experts, plus nombreuses sont les chances que la différence entre les groupes soit significative. Cependant, pour des raisons associées au recrutement, il n'est pas réaliste de penser qu'il soit possible de recruter autant d'experts et de novices à un niveau supérieur à celui du baccalauréat.

2.3. En choisissant la technique d'imagerie cérébrale la plus appropriée pour tester les hypothèses de recherche

Il existe plusieurs techniques d'imagerie cérébrale pour mesurer un signal corrélé avec l'activité cérébrale. Chacune des techniques comporte des avantages et des inconvénients. La tomographie par émission de positrons permet de mesurer la variation locale de débit sanguin (ce qui peut être utile pour répondre à des questions de recherche en lien avec la réponse physiologique à l'activation cérébrale), mais cette technologie nécessite l'injection de marqueurs radioactifs dans le système sanguin. Plus ancienne, cette technique n'offre pas une résolution spatiale aussi bonne que l'IRMf. L'électroencéphalographie a une excellente résolution temporelle et mesure directement l'activité électrique du cerveau, mais ne permet pas la localisation de l'activation. La magnétoencéphalographie offre une excellente résolution spatiale et temporelle en plus de mesurer directement les champs magnétiques produits par les potentiels d'action des neurones. Par contre, cette technologie ne permet pas de mesurer l'activité sous-corticale du cortex cingulaire antérieur qui nous intéresse. L'imagerie optique, ou tomographie optique, facilite la localisation et est moins sensible aux mouvements de tête que les autres techniques, en plus d'être relativement silencieuse. mais la résolution spatiale est moins bonne, et cette technologie, comme la magnétoencéphalographie, ne permet pas d'atteindre le cortex cingulaire antérieur.

L'IRMf est choisie dans notre étude parce qu'il s'agit de la seule technique d'imagerie non invasive (c'est-à-dire qu'elle ne requiert pas l'utilisation de marqueurs radioactifs comme la tomographie par émission de positrons) qui permet d'étudier l'activation de régions sous-corticales, comme le cortex cingulaire antérieur.

L'IRMf est une technologie récente, utilisée seulement depuis le début des années 1990. L'appareil est composé d'un aimant supraconducteur puissant (de 1,5 à 3,0 Tesla, et parfois même plus), de gradients magnétiques utilisés pour la localisation spatiale et de générateurs d'ondes électromagnétiques qui agissent aussi comme des antennes captant le signal. Le principe de l'IRMf repose sur le fait que, lors de l'activation d'une région cérébrale, on observe une augmentation locale de la concentration d'hémoglobine oxygénée. Comme l'hémoglobine oxygénée et l'hémoglobine désoxygénée ne présentent pas les mêmes propriétés magnétiques, on observe une variation de signal lorsque la concentration change et que l'activité cérébrale varie.

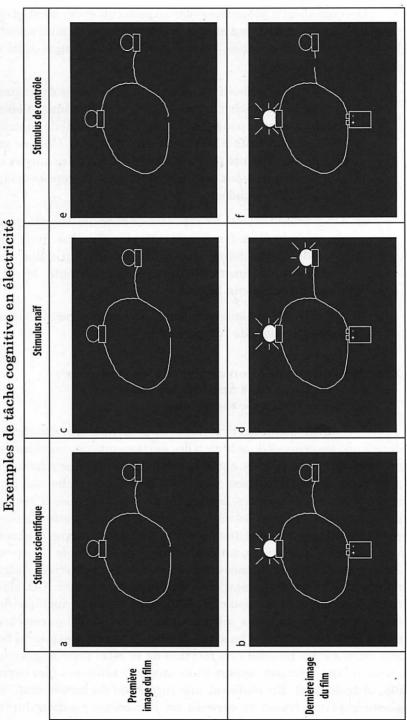
2.4. En concevant des tâches cognitives qui respectent les contraintes liées à l'utilisation de l'imagerie cérébrale

Pour concevoir des tâches cognitives utilisables en neuroimagerie, il faut respecter un ensemble de contraintes qu'impose l'utilisation de l'IRMf. Premièrement, lors de l'acquisition des données, la tête des participants doit demeurer complètement immobile, puisque des mouvements de tête de l'ordre de quelques millimètres peuvent rendre les données inutilisables. À cause de cette contrainte. il est préférable d'éviter de demander aux participants de fournir des réponses verbales ou écrites. On peut cependant demander aux participants d'appuyer sur des boutons, la tâche devant donc impliquer un choix de réponses. En raison du bruit de l'appareil durant l'acquisition des données, il est difficile de présenter des informations verbales aux participants, les informations visuelles sont donc à privilégier (images, films, etc.). En plus des contraintes liées à l'acquisition des données, il existe des contraintes liées à l'analyse des données. Il faut savoir que le signal découlant de l'activation d'une région cérébrale est très faible (de l'ordre de 1 à 2 % plus grand que le niveau de base). Pour maximiser les chances de détecter une différence statistiquement significative, il faut plusieurs sujets (10 à 20 sujets par groupe, selon l'hypothèse de recherche à vérifier) ainsi que plusieurs mesures pour chacune des conditions expérimentales (habituellement, entre 20 et 30 mesures).

Dans notre étude sur les mécanismes cérébraux du changement conceptuel en physique, la tâche cognitive demandée au participant s'inspire de celle de Dunbar et coll. (2007) et consiste à déterminer (en appuyant sur l'un ou l'autre des boutons) si chaque stimulus présenté à l'écran est conforme à ce qui se passerait en situation réelle. Les stimuli utilisés dans la tâche mettent en scène deux conceptions particulières, l'une en mécanique et l'autre en électricité. Ces conceptions courantes et inappropriées sont largement documentées en éducation (Confrey, 1990; Wandersee et coll., 1994): les objets plus lourds tombent plus vite (dans un environnement sans friction) et un seul fil est nécessaire pour allumer une ampoule. Pour chacune des conceptions, on présente aux participants des stimuli naïfs (c'est-à-dire conformes aux conceptions inappropriées des novices), des stimuli scientifiques (c'est-à-dire conformes aux conceptions des experts) et des stimuli de contrôle (auxquels les novices et les experts répondent de la même facon). Les tableaux 1 et 2 présentent quelques exemples d'images tirées des stimuli utilisés dans la tâche.

Deux aspects distinguent notre étude des études antérieures. Premièrement, aucune étude n'a porté sur les mécanismes cérébraux du changement conceptuel en électricité (seuls les mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en mécanique et en chimie ont été étudiés). Deuxièmement, nous allons faire subir un conflit cognitif aux participants en leur donnant, au milieu de la tâche, les réponses scientifiquement appropriées. Ces réponses scientifiques s'opposent aux réponses inappropriées que les novices auront fournies précédemment. En comparant l'activité cérébrale avant et après ce conflit cognitif, nous serons en mesure de déterminer les modifications dans l'activité cérébrale engendrée par cette intervention.

TABLEAU 2



Les stimuli sont présentés selon un protocole événementiel qui consiste à alterner de façon aléatoire stimuli naïfs, stimuli scientifiques et stimuli de contrôle. La séance d'IRMf de chaque sujet se déroule en trois étapes :

- On présente d'abord les stimuli en deux séries de 5 minutes comprenant chacune 60 stimuli en mécanique et 60 en électricité (soit, pour chaque série : 20 stimuli de contrôle + 20 stimuli naïfs + 20 stimuli scientifiques). Chaque stimulus est présenté pendant environ 2 secondes suivies de 3 secondes de repos en moyenne (temps de repos variant de 2,5 à 3,5 secondes)
- 2) On présente ensuite les réponses de chacune des catégories de stimuli deux fois (on montre le stimulus, puis une seconde image donne la réponse en écrivant « Bon » ou « Mauvais »). Durant cette étape d'une minute, le sujet n'appuie sur aucun bouton.
- 3) On présente finalement à nouveau les deux séries de stimuli présentées lors de l'étape 1.

2.5. En prétraitant et en analysant les données de la façon la plus appropriée pour tester les hypothèses de recherche

Après avoir défini des hypothèses de recherche opérationnelles, déterminé les critères de sélection des participants pour obtenir des groupes assez homogènes, choisi la meilleure technique d'imagerie pour répondre à l'hypothèse posée, et élaboré une tâche cognitive respectant les contraintes liées à l'imagerie cérébrale, il reste à prétraiter et à analyser les données. Afin d'être en mesure de comparer les images les unes aux autres, nous devons corriger le mouvement car, rappelons-le, un déplacement de la tête de l'ordre de 2 mm peut rendre les données inexploitables. Pour y arriver, l'algorithme de Cox et Jesmanowicz (1999) peut être utilisé. Cet algorithme considère le cerveau comme un objet rigide et applique des transformations spatiales selon six paramètres (trois paramètres associés aux translations en x, y et z, ainsi que trois paramètres liés aux trois angles possibles de rotation de la tête) pour aligner les images d'une série par rapport à une image de référence (par exemple, la troisième). En réalisant une correction du mouvement, on s'assure qu'une région du cerveau est à la même position durant

toute la période de l'acquisition des données, ce qui est essentiel pour faire les analyses.

Une fois la correction du mouvement réalisée, il est nécessaire d'améliorer le rapport signal sur bruit en procédant à un lissage des données. Ce lissage consiste à répartir le signal de chacune des unités de volumes (ou voxels) du cerveau aux voxels environnants. Pour ce faire, on répartit le signal selon une fonction gaussienne d'une largeur d'environ 6 mm à la moitié de la hauteur du maximum (environ deux fois la taille d'un voxel). En plus d'améliorer le rapport signal sur bruit en diminuant les pics des intensités extrêmes et en renforcant la valeur des voxels fortement activés entourés de voxels qui sont eux aussi fortement activés, cela diminue les risques de considérer des artefacts comme des régions significativement activées. Un autre avantage considérable du lissage est de faciliter la détection de régions qui sont activées chez plusieurs sujets. En effet, comme chaque cerveau est différent, le lissage permet d'éviter la situation où un voxel ne serait pas clairement activé parce que les régions cérébrales d'intérêt d'une personne ne se trouvent pas exactement dans les mêmes voxels que celles d'une autre.

Pour tempérer les données de plusieurs sujets et comparer l'activité cérébrale des sujets, il faut procéder à la normalisation des cerveaux des individus. En effet, puisque chaque cerveau possède une forme différente et que, pourtant, nous voulons comparer l'activation de régions précises, il est nécessaire de modifier la forme des cerveaux des sujets pour qu'ils aient tous la même largeur, la même longueur, etc. Les logiciels permettant d'accomplir cette normalisation repèrent les contours d'une image de référence et les contours des images du cerveau à transformer. Le cerveau de référence du Montreal Neurological Institute, formé de la moyenne de 152 cerveaux, peut être utilisé à cette fin. Après avoir identifié les contours, les logiciels les normalisent afin qu'ils soient similaires à l'image de référence.

Une fois les données corrigées pour le mouvement, lissées et normalisées, on peut évaluer si une région est clairement activée à partir d'un test-t. Les analyses statistiques se basent sur un modèle linéaire général dans lequel on suppose que les données (y) sont modélisables à partir de la combinaison linéaire de différents facteurs (x) ayant différentes pondérations (β) ainsi qu'une certaine variabilité inexpliquée par le modèle (ε).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon$$
 (1)

Les facteurs dépendent du design de l'expérience, c'est-à-dire de l'ordre de présentation des stimuli (départ, durée, etc.), mais aussi d'autres facteurs, tels l'activation de base (au repos) et des facteurs liés à la dérive temporelle du signal due à l'appareillage. Les facteurs qui dépendent du design sont modélisés par la multiplication de la fonction de la réponse hémodynamique (c'est-à-dire la façon dont le signal augmente progressivement à partir du début de la présentation du stimulus jusqu'à son déclin progressif quelques secondes après la présentation du stimulus). Ensuite, par la méthode des moindres carrés, on obtient les valeurs des différentes pondérations (β) qui minimisent ε. Sous forme matricielle comprenant les valeurs de tous les voxels à tous les temps, on obtient :

$$Y = X\beta + \varepsilon \tag{2}$$

Pour déterminer quelles sont les régions qui sont clairement activées, c'est-à-dire si β est significativement plus grand que zéro, on utilise un test-t divisant la moyenne de la pondération des facteurs $(\overline{\beta})$ par l'écart-type des pondérations :

$$t = \frac{\overline{\beta}}{\cancel{E}cart - type(\overline{\beta})}$$
 (3)

Pour déterminer s'il existe une différence importante entre deux régions ou deux groupes, on a également recours à un test-t en utilisant β_a - β_b au lieu de β .

La détermination du seuil de signification est problématique à cause du nombre considérable de voxels impliqués (par exemple, $n=100\,000$). Si on fixe le seuil à $\alpha=0,05$, un nombre considérable de voxels paraîtront avoir été clairement activés (5000), mais ils ne l'auront pas été. Si l'on applique la correction de Bonferroni pour les comparaisons multiples,

$$\alpha_{\text{bon}} = \alpha / n \tag{4}$$

on obtient $\alpha_{\rm bon}=0.05/100~000=0.000~000~5$, ce qui est trop strict et risque d'augmenter les possibilités que des régions cérébrales ne paraissent pas vraiment activées, alors qu'en réalité elles le sont. La correction de Bonferroni est habituellement pertinente si l'on postule que tous les voxels sont indépendants, mais ce n'est pas le cas ici. D'abord, les voxels adjacents sont fortement corrélés (pour des raisons physiologiques, mais aussi techniques liées à la saisie

du signal d'IRMf) et, ensuite, puisqu'un lissage spatial est appliqué aux données, les voxels deviennent nécessairement corrélés les uns aux autres. La solution consiste à déterminer le seuil de signification à partir de la théorie des champs gaussiens aléatoires (Worsley et coll., 1995). Cette théorie évalue le nombre de voxels qui sont réellement indépendants (R) à partir de la corrélation spatiale qui est supposée gaussienne, et dont on cherche la largeur à la moitié de l'intensité (V). Après avoir déterminé V par la théorie des champs gaussiens aléatoires, on peut estimer le nombre de voxels indépendants par:

$$R = n / V^3 \tag{5}$$

Si V = 3, alors le nombre de voxels indépendants est réduit de 3³ fois. Dans notre étude, la signification sera déterminée de cette façon.

Habituellement, nous ne voulons pas connaître l'activité cérébrale d'un seul individu, mais plutôt celle d'un groupe entier de sujets, alors il faut tempérer les résultats de l'ensemble des sujets. Il existe trois façons de le faire. La première est une analyse à effets fixes dans laquelle on combine tous les points de tous les sujets dans une seule matrice pour ensuite réaliser des statistiques. La seconde est une analyse à effets aléatoires réalisée en deux temps. On obtient d'abord les cartes statistiques de chacun des sujets et on compare ensuite statistiquement l'ensemble des cartes ainsi obtenues. Chacune de ces deux méthodes comporte des avantages et des inconvénients (Huettel et coll., 2004). La première méthode est très sensible aux données extrêmes et ne permet pas d'extrapoler les résultats à l'ensemble de la population à l'étude. Si, par exemple, sur un échantillon de 10 sujets, nous avons deux sujets qui réagissent fortement aux stimuli, alors on peut obtenir des résultats statistiquement significatifs pour l'ensemble du groupe, même si huit des sujets n'ont pas réagi à la tâche. La seconde comporte pour sa part l'avantage de permettre de généraliser les résultats à la population étudiée, parce que les données de chacun des sujets ont été testées statistiquement et que les cartes statistiques obtenues ont été ensuite testées pour voir si elles étaient statistiquement comparables. Cependant, elle est particulièrement stricte, et il existe un risque important de ne pas obtenir de résultats statistiquement significatifs, alors que l'effet est bien présent. La troisième façon est une alternative à ces deux types d'analyse : l'analyse mixte qui utilise des algorithmes de calculs différents pour se situer dans un continuum entre les analyses à effets fixes et celles à effets aléatoires. Dans notre étude, nous comptons utiliser les algorithmes d'analyse à effets mixtes développés par Worsley, Liao, Aston, Petre, Duncan, Morales et coll. (2002).

CONCLUSION

Comme nous l'avons vu, l'imagerie cérébrale offre des opportunités de recherche inédites et des plus prometteuses. En permettant d'obtenir des résultats de recherche sur une variable dépendante qui n'a jamais pu être mesurée auparavant (l'activité cérébrale), cette technologie permet de contribuer de manière considérable au développement des connaissances sur les processus du changement conceptuel. Déjà, les premières études de ce domaine en émergence donnent la possibilité de remettre en question la représentation communément admise selon laquelle le changement conceptuel implique l'effacement ou la restructuration des connaissances antérieures, et de proposer de nouveaux concepts comme celui d'inhibition. Bien que des plus intéressantes, l'utilisation de l'imagerie cérébrale impose cependant de nombreuses contraintes qui rendent complexe et exigeante la démarche de recherche, de la formulation d'hypothèses opérationnelles à l'analyse des données,.

L'une des étapes les plus difficiles dans un projet de recherche impliquant la neuro-imagerie est l'élaboration d'une tâche cognitive répondant aux contraintes imposées par cette technologie. Heureusement, au fur et à mesure que les études en neuro-imagerie se développeront, de plus en plus de tâches connues par les chercheurs pourront être utilisées et réutilisées dans différents contextes de recherche par différents chercheurs, comme c'est le cas actuellement en neuroscience cognitive. D'ailleurs, depuis quelques années, un certain nombre de tâches ont été développées pour étudier notamment la lecture et, plus récemment, les mathématiques. À partir de ces tâches qui seront de plus en plus nombreuses et de plus en plus adaptées aux problèmes liés au domaine de l'éducation. il sera possible d'envisager une diversité d'études. Par exemple, on pourra étudier les fonctions cérébrales impliquées dans la réalisation d'une tâche, comparer l'activité cérébrale de novices et d'experts en sciences, et même étudier l'effet d'une intervention pédagogique sur le cerveau en faisant réaliser la tâche aux participants avant et après l'intervention. Mieux encore, il sera possible de comparer les effets de différentes approches pédagogiques sur le cerveau telles que l'enseignement magistral et l'apprentissage par la découverte. Bref, dans les prochaines années, les études utilisant l'imagerie cérébrale seront de plus en plus nombreuses et contribueront manifestement à développer nos connaissances sur les processus liés à l'apprentissage des sciences et des savoirs scolaires en général.

BIBLIOGRAPHIE

- Botvinick, M. M. (2007), « Conflict monitoring and decision making: reconciling two perspectives on anterior cingulate function », Cognitive, Affective, & Behavior Neuroscience, 7 (4), p. 356-366.
- Chi, M. T. H. (1992), «Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science », dans R. Giere (Ed.), Cognitive models of Science: Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Minneapolis, MN: University of Minnesota Press, p. 129-186.
- Confrey, J. (1990). « A review of the research on student conceptions in mathematics, science, and programming », dans C. B. Cazden (Ed.), Review of Research in Education 16, Washington, NW: American Educational Research Association, p. 3-56.
- Cox, B. et A. Jesmanowicz, (1999), « Real-time 3D image registration for functional MRI », Magnetic Resonance in Medicine, 41, p. 1014-1018.
- diSessa, A. A. (1993), « Toward an epistemology of physics », dans Cognition and Instruction, 10 (2-3), p.105-225.
- diSessa, A. A. (2006), « A history of conceptual change research : threads and fault lines », dans R. K. Sawyer (Ed.), Cambridge Handbook of the Learning Sciences, Cambridge, UK: Cambridge University Press, p. 265-281.
- Duit, R. (2007), « Bibliography on students' and teachers' conceptions and science education », Retrieved March 12th, 2007, from http://ipn. uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html
- Duit, R. et D. F. Treagust (2003), « Conceptual change : a powerful framework for improving science teaching and learning», International Journal of Science Education, 25 (6), p. 671-688.
- Dunbar, K. N., J. A. Fugelsang et C. Stein, (2007), « Do naïve theories ever go away? Using brain and behavior to understand changes in concepts », dabs M. C. Lovett & P. Shah (Eds.), Thinking with Data: 33rd Carnegie Symposium on Cognition, Mahwah, NJ: Erlbaum, p. 193-206. Retrieved May 20th, 2008, from http://www.dartmouth. edu/~kndunbar/publications.html
- Fugelsang, J. A. et K. N. Dunbar (2005), « Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking », Neuropsychologia, 43 (8), p. 1204-1213.

- Gazzaniga, M. S. (2004), Cognitive neurosciences III. Cambridge, MA: MIT Press.
- Geake, J. et P. Cooper (2003), « Cognitive neuroscience: implications for education», Westminster Studies in Education, 26 (1), p. 7-20.
- Geake, J. G. (2003), « Adapting Middle Level educational practices to current research on brain functioning », Journal of the New England League of Middle Schools, 15(2), p. 6-12.
- Geake, J. G. (2004), « Cognitive neuroscience and education: two-way traffic or one-way street?», Westminster Studies in Education, 27 (1), p. 87-98.
- Goel, V. et R. J. Dolan (2003), « Explaining modulation of reasoning by belief », Cognition, 87 (1), p.11-22.
- Goswami, U. (2004), « Neuroscience and education », British Journal of Educational Psychology, 74 (1), p. 1-14.
- Houdé, O. (2006), « Neuropédagogie ? Entretien avec Olivier Houdé réalisé par Gilles Marchand », Le Monde l'intelligence, 4, p. 18-19.
- Houdé, O., B. Mazoyer et N. Tzourio-Mazoyer (2001), Cerveau et psychologie: introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle. Paris: Presses Universitaires de France.
- Houde, O., L. Zago, E. Mellet, S. Moutier, A. Pineau, B. Mazoyer et coll. (2000), « Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training », Journal of Cognitive Neuroscience, 12 (5), p.721-728.
- Huettel, S. A., A. W. Song et G. McCarthy, (2004), Functional magnetic resonance imaging. Sunderland, USA: Sinauer Associates Inc.
- Kuhn, T. S. (1962), The structure of scientific revolutions. Chicago: University of Chicago Press.
- Kwong, K. K., J. W. Belliveau, D. A. Chesler, I. E. Goldberg, R. M. Weisskoff, B. P. Poncelet et coll (1992), « Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation », Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 89, p. 5675-5679.
- Legendre, M.-F. (2002), « Le rôle du raisonnement qualitatif dans les processus de changement conceptuel et ses implications pour l'enseignement », dans R. M. J. Toussaint (Ed.), Changement conceptuel et apprentissage des sciences, recherches et pratiques, Montréal : Les Éditions Logiques, p. 177-203.
- Masson, S. (2007), « Enseigner les sciences en s'appuyant sur la neurodidactique des sciences », dans P. Potvin, M. Riopel & S. Masson (Ed.), Enseigner les sciences : regards multiples. Québec : Éditions MultiMondes.
- Mazoyer, P., B. Wicker, et P. Fonlupt (2002), «A neural network elicited by parametric manipulation of the attention load », NeuroReport, 13 (17), p. 2331.

- McCloskey, M. (1983, April), Intuitive Physics. Scientific American, p. 122-130.
- Nelson, J. K., R. A. Lizcano, L. Atkins et K. Dunbar (2007, November 17), Conceptuel judgments of expert vs. novice chemistry students: an fRMI study. Paper presented at the 48th Annual meeting of the Psychonomic Society, Hyatt Regency Hotel Long Beach, California.
- O'Boyle, M. W. et H. S. Gill (1998), « On the relevance of research findings in cognitive neuroscience to educational practice », Educational Psychology Review, 10 (4), p. 397-409.
- OCDE (2007). Comprendre le cerveau : naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage. Paris : Éditions de l'OCDE.
- Ogawa, S., D. W. Tank, R. S. Menon, J. M. Ellermann, S.-G. Kim, H. Merkle et coll. (1992), « Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: Functional brain mapping using MRI », Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 89 p. 5951-5955.
- Periago, M. C. et X. Bohigas (2005), « A study of second-year engineering students' alternative conceptions about electric potential, current intensity and Ohm's law », European Journal of Engineering Education, 30 (1), p. 71-80.
- Pettito, L.-A. et K. Dunbar (2004, October 6-8), New findings from educational neuroscience on bilingual brains, scientific brains, and the educated mind. Paper presented at the Conference on Building Usable Knowledge in Mind, Brain, & Education, Havard Graduate School of Education.
- Piaget, J. (1967), Biologie et connaissance. Paris : Gallimard.
- Pintrich, P. R. (1993), « Beyond cold conceptual change : The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change », Review of Educational Research, 63 (2), p. 167-199.
- Poldrack, R. A., J. Clark, E. J. Pare-Blagoev, D. Shohamy, J. Creso Moyano, C. Myers etcoll. (2001), « Interactive memory systems in the human brain », Nature, 414 (6863), p. 546-550.
- Posner, G. J., K. A. Strike, P. W. Hewson et W. A. Gertzog (1982), « Accommodation of a scientific conception : Toward a theory of conceptual change », Science Education, 66, p.211-227.
- Stavy, R. et D. Tirosh, (2000), How Students (Mis-)Understand Science and Mathematics: Intuitive Rules. Ways of Knowing in Science Series. New York: Teachers College Press.
- Thouin, M. (1996), Les conceptions des élèves et les activités d'apprentissage en sciences de la nature au primaire. Montréal : Faculté des sciences de l'éducation de l'Université de Montréal.
- Viennot, L. (1979), «Spontaneous Reasoning in Elementary Dynamics» European Journal of Science Education, 1 (2), p. 205-221.

- Vosniadou, S. (1994), « Capturing and modeling the process of conceptual change », Learning and Instruction, 4 (1), p. 45-69.
- Wandersee, J. H., J. J. Mintzes et J. D. Novak (1994), « Research on alternative conceptions in science », dans D. L. Gabel (Ed.), Handbook of research on science teaching and learning, New York: Macmillan. p. 177-210.
- Worsley, K. J., C. H. Liao, J. Aston, V. Petre, G. H. Duncan, F., Morales et coll. (2002), « A general statistical analysis for fMRI data », NeuroImage, 15, p. 1-15.