

# Le rôle de l'imagerie cérébrale pour comprendre les difficultés associées à l'apprentissage de concepts contre-intuitifs en sciences

G. ALLAIRE-DUQUETTE\*, M. BÉLANGER\*\*, S. MASSON\*\*\*

\* Doctorante en éducation, Laboratoire de recherche en neuroéducation, Département de didactique, Université du Québec à Montréal, C.P.8888, Succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3P8. Email : [allaire-duquette.genevieve@uqam.ca](mailto:allaire-duquette.genevieve@uqam.ca)

\*\* Professeur, Département des sciences de l'éducation, Université du Québec à Rimouski.

\*\*\* Professeur, Laboratoire de recherche en neuroéducation, Département de didactique, Université du Québec à Montréal.

**RÉSUMÉ :** *Le rôle de l'imagerie cérébrale pour comprendre les difficultés associées à l'apprentissage de concepts contre-intuitifs en sciences*

Plusieurs études révèlent que certains concepts scientifiques sont contre-intuitifs et difficiles à apprendre. Toutefois, les raisons qui expliquent pourquoi certains élèves réussissent moins bien que d'autres à comprendre les concepts contre-intuitifs demeurent peu connues. De récentes recherches utilisant l'imagerie cérébrale appuient une hypothèse selon laquelle cet apprentissage est associé à la mobilisation de l'inhibition, c'est-à-dire à la capacité de contrôler des réponses spontanées.

**Mots clés :** *Neuroéducation – Didactique des sciences – Inhibition – Intuition – Conceptions.*

**SUMMARY:** *The role of brain imaging in the understanding of the problems associated with learning of counter-intuitive concepts in science*

Many studies have revealed that certain concepts in science are counter-intuitive and therefore difficult to learn. However, we still poorly understand why some students have more difficulty than others to understand these concepts. Recent brain imaging studies support the hypothesis that learning counter-intuitive concepts depends on the mobilization of inhibition, the ability to control spontaneous responses.

**Key words:** *Neuroeducation – Science education – Inhibition – Intuition – Conceptions.*

**RESUMEN:** *El papel de la exploración cerebral por imágenes para conocer las dificultades asociadas al aprendizaje de conceptos contraintuitivos en ciencias*

Varios estudios demuestran que ciertos conceptos científicos son contraintuitivos y difíciles de aprender. Sin embargo, aún no se conocen bien las razones que explican por qué ciertos alumnos comprenden peor que otros los conceptos contraintuitivos. Recientes estudios que utilizan diagnóstico por imagen cerebral apoyan una hipótesis según la cual este aprendizaje está asociado a la movilización de la inhibición, es decir, a la capacidad de controlar respuestas espontáneas.

**Palabras clave:** *Neuroeducación – Didáctica de las ciencias – Inhibición – Intuición – Concepciones.*

## INTRODUCTION

L'apprentissage des sciences est réputé difficile et le développement de la culture scientifique préoccupe encore aujourd'hui de nombreux milieux (Organisation de coopération et de développement économiques [OCDE], 2007a ; Wendt & Rockinson-Szapkiw, 2014). Plusieurs enquêtes révèlent en effet qu'une majorité des adultes scolarisés sont difficilement capables de fournir une explication valable aux phénomènes scientifiques simples (Miller, 2012 ; National Science Foundation & National Center for Science and Engineering Statistics, 2010 ; Commission européenne, 2001). La capacité de prédire, d'expliquer ou de définir les phénomènes scientifiques de manière qualitative, c'est-à-dire sans l'usage d'outils mathématiques, demeure d'ailleurs l'un des aspects de l'apprentissage des sciences le moins bien compris des chercheurs (Laugksch, 2000 ; NGSS Lead States, 2013 ; Roberts, 2007) et cela en fait encore aujourd'hui l'un des trois thèmes de recherche les plus explorés en didactique des sciences (Lin, Lin & Tsai, 2013).

Les recherches des dernières décennies ont démontré que, dans un grand nombre de cas, comprendre certains concepts scientifiques requiert que soit surmontée une difficulté importante, celle de l'existence de conceptions erronées préexistantes chez les élèves. Parmi les différentes explications proposées à l'origine de ces conceptions erronées, certains chercheurs mettent en avant l'interférence que peut occasionner l'intuition dans le développement d'une compréhension des concepts scientifiques (voir par exemple Stavy & Tirosh, 2000). Cette proposition recèle un intérêt particulier puisqu'elle permet notamment d'entrevoir la contribution d'un mécanisme précis, celui de l'inhibition, dans la compréhension des concepts contre-intuitifs. Afin de mieux comprendre la portée de cette hypothèse, l'article vise d'abord à dresser un bref portrait des difficultés de compréhension des concepts en sciences. Ensuite, il est question du mécanisme de l'inhibition et des recherches qui appuient le lien entre l'inhibition et l'apprentissage des concepts scientifiques contre-intuitifs. Enfin, le rôle que l'imagerie cérébrale peut jouer pour mieux comprendre les difficultés que rencontrent les élèves lors de l'apprentissage des concepts scientifiques contre-intuitifs est expliqué.

### L'APPRENTISSAGE DES CONCEPTS CONTRE-INTUITIFS

Depuis la fin des années 70, des chercheurs en didactique des sciences savent que les élèves possèdent, avant même leurs premiers cours de sciences, des conceptions erronées qui s'opposent aux connaissances scientifiques à acquérir (diSessa, 2006). Au niveau secondaire par exemple, Kim et Pak (2002) rapportent qu'une proportion significative des élèves éprouve des difficultés à distinguer les concepts de force, d'accélération et de vitesse. Mills Shaw *et al.* (2008) ont quant à eux observé que même après avoir reçu une rétroaction de l'enseignant, plus de la moitié des élèves possèdent toujours une faible compréhension des concepts

comme les allèles, les gènes ou la dominance, pourtant des préalables essentiels à la résolution de problèmes en génétique (Karagoz, 2011).

À partir du constat de l'existence des conceptions erronées, un courant de recherche sur le changement conceptuel est né et s'affaire depuis plusieurs années à expliquer comment un élève en arrive à faire évoluer ses conceptions erronées en conceptions scientifiques. Certains de ces modèles laissent entendre que l'intuition puisse être, dans une certaine mesure, en cause dans les difficultés de compréhension des concepts en science (voir par exemple diSessa, 1983 ; Stavy & Tirosh, 2000 ; Clement, 1993 ; Brown, 1993 ; Brown & Hammer, 2008 ; Potvin, 2013). Par exemple, selon le modèle de Stavy & Tirosh (2000), les conceptions erronées des élèves proviennent d'un appui inadéquat sur des règles intuitives, à savoir des raisonnements perçus comme évidents et donnés avec confiance. Les élèves sont par exemple intuitivement amenés à penser que « plus il y a une quantité de A, plus il y aura une quantité de B ». Dans une tâche où les élèves doivent choisir laquelle, parmi deux balles différentes, coule le plus, les élèves pourraient penser, à tort, que plus l'objet est volumineux, plus sa masse est importante, donc plus il s'enfoncera dans l'eau. Ainsi, la compréhension de concepts scientifiques comme celui de masse volumique suppose que l'élève apprenne à surmonter une intuition, ou une habitude spontanée à recourir à une règle intuitive.

Le raisonnement intuitif est donc considéré comme l'une des sources de difficultés lors de l'apprentissage de concepts scientifiques puisqu'il mène les élèves à formuler et entretenir des conceptions erronées (Duit, 2007 ; Fischbein, 1987 ; Stavy & Tirosh, 2000 ; Babai *et al.*, 2012 ; Potvin, 2013). Or, il semble que réussir à surmonter un raisonnement intuitif s'expliquerait en partie par la capacité à recourir à l'inhibition, c'est-à-dire à la capacité de contrôler ou de bloquer des réponses ou des stratégies spontanées (Shtulman & Valcarcel, 2012 ; Masson, Potvin, Riopel & Brault Foisy, 2014 ; Brault Foisy *et al.*, accepté). Le rôle positif de l'inhibition dans le développement cognitif et l'apprentissage a d'ailleurs été démontré à plusieurs reprises, notamment dans l'apprentissage de la logique (voir par exemple Houdé *et al.*, 2000) et en arithmétique (Lubin, Vidal, Lanoë, Houdé & Borst, 2013). Dans une recherche portant sur la résolution de problèmes d'arithmétique verbaux, Lubin *et al.* (2013) ont montré que l'inhibition était nécessaire à la réussite de certains problèmes contre-intuitifs (à référent inconnu), c'est-à-dire lorsque la relation (par exemple « plus que ») est contraire à l'opération arithmétique réalisée (dans ce cas-ci ce serait la soustraction). Par exemple, dans le problème « Vrai ou faux : si Marie a 25 billes et qu'elle en a 5 de plus que Jean, Jean a 20 billes », la relation (plus que) est contraire à l'opération de soustraction. Ainsi, la stratégie spontanée « je vois "de plus" donc je dois additionner » s'avère intuitive, mais parfois erronée. À partir d'une méthodologie basée sur le priming négatif (Tipper 1995 ; 2001), les résultats démontrent que, pour réussir avec succès les problèmes où le référent est inconnu, il faut avoir recours à la capacité d'inhiber une stratégie de raisonnement inappropriée.

La recherche mène donc à penser que l'inhibition puisse être une capacité importante dans l'apprentissage de certaines habiletés en arithmétique.

En science plus particulièrement, l'étude de Shtulman & Valcarcel (2012) a quant à elle montré que, dans une dizaine de domaines scientifiques, il faut plus de temps à de jeunes adultes pour répondre correctement aux questions qui portent sur des concepts contre-intuitifs par rapport à des concepts intuitifs. Ce résultat laisse croire que lorsqu'une question porte sur un concept contre-intuitif, la réponse est plus longue à fournir puisqu'il serait nécessaire d'inhiber une réponse spontanée ou intuitive qui serait contraire au concept scientifique faisant l'objet de la question. De plus, Masson *et al.* (2014) ainsi que Brault Foisy *et al.* (accepté) ont, à l'aide de l'imagerie cérébrale, tenté d'identifier les mécanismes cérébraux liés à l'expertise conceptuelle en physique. Dans la recherche de Masson *et al.* (2014), les experts devaient déterminer si des schémas de circuits électriques étaient scientifiquement corrects ou incorrects. Ces circuits mettaient en scène la conception erronée selon laquelle un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule. Les résultats de cette étude montrent que les experts activent davantage que des novices des régions cérébrales associées à l'inhibition. Dans la seconde recherche (Brault Foisy *et al.*, accepté), des experts en sciences devaient juger si les films qui présentaient des balles de différentes grandeurs et masses tombant au sol étaient scientifiquement corrects ou incorrects. Comme pour l'étude de Masson *et al.* (2014), les films étaient conçus à partir d'une conception erronée, dans ce cas la conception selon laquelle les objets plus lourds tombent plus rapidement que les objets plus légers. Les résultats indiquent également que les experts en physique activent davantage que des novices des régions associées à l'inhibition. Les résultats de ces deux études appuient donc l'hypothèse selon laquelle les conceptions intuitives, mais erronées, nécessiteraient d'être inhibées pour démontrer une compréhension de concepts scientifiques, du moins dans les domaines étudiés jusqu'à présent. En plus, deux études ont montré que, s'ils ont un temps limité pour répondre, des adultes sains et des scientifiques professionnels commettent plus d'erreurs lorsqu'ils répondent à des questions scientifiques liées à des conceptions fréquentes (Kelemen & Rosset, 2009 ; Kelemen, Rottman & Seston, 2012).

## LE MÉCANISME DE L'INHIBITION

Des recherches récentes mènent donc à penser que des mécanismes cérébraux associés à l'inhibition seraient mobilisés pour arriver à apprendre certains concepts en sciences. En plus, les nouvelles données fournies par l'imagerie cérébrale montrent qu'il peut être nécessaire d'activer des régions cérébrales liées à l'inhibition afin de bloquer l'activation de réponses spontanées (par exemple Masson *et al.*, 2014 ; Houdé *et al.*, 2000 ; Houdé, 2013). Or, sur le plan méthodologique la mesure de l'inhibition représente un défi important puisque bien que la capacité d'inhibition puisse s'acquérir de manière consciente notamment par des interventions éducatives (p. ex. Houdé *et al.*, 2000),

l'inhibition est généralement un mécanisme qui est mobilisé de manière inconsciente, c'est-à-dire qu'il n'est pas porté à la conscience de l'élève lorsqu'il la mobilise. L'étude de ce mécanisme profite donc considérablement d'une perspective neuroscientifique ou cérébrale par rapport aux approches méthodologiques plus classiques comme les enquêtes, les entrevues ou les questionnaires. De fait, les quelques résultats de recherches menées par l'imagerie cérébrale disponibles à ce jour semblent confirmer ce que certains modèles de changement conceptuel (p. ex. Stavy & Tirosh, 2000) ou certaines études en psychologie cognitive (Shtulman & Valcarcel, 2012) laissaient présager, à savoir que la mobilisation de l'inhibition, c'est-à-dire la capacité de contrôler ou de bloquer des réponses ou des stratégies spontanées (Houdé, 2003), peut être nécessaire pour sélectionner une réponse scientifiquement valable à une question faisant intervenir un raisonnement intuitif.

Le rôle de l'inhibition pour surmonter des réponses qui sont habituelles, afin de sélectionner des réponses alternatives, est d'ailleurs bien documenté (voir par exemple Ward, 2010). De manière générale, l'inhibition est définie comme une fonction exécutive de haut niveau qui intervient pour superviser ou contrôler les actions (Houdé *et al.*, 2000). Les fonctions exécutives assurent, selon Houdé (2013), le contrôle dans l'exécution des conduites. L'inhibition peut être, de manière plus précise, entendue comme une habileté à empêcher l'expression de comportements inappropriés, dangereux ou devenus inutiles (Chambers, Garavan & Bellgrove, 2009). Comme le précise Houdé (2014), ce terme désigne la capacité à résister et à contrôler les automatismes de la pensée qui peuvent parfois nous mener à commettre des erreurs.

D'un point de vue cérébral, l'inhibition consiste en une diminution de l'activité d'une région spécifique du cerveau due au contrôle exercé par une autre région (Ward, 2010). Depuis les toutes premières études en neuropsychologie, le cortex préfrontal a été pressenti comme une région cérébrale clé du contrôle cognitif (Holmes, 1938 ; Luria, 1966 ; Miller & Cohen, 2001 cités dans Chambers *et al.*, 2009). Aujourd'hui, les études en neurosciences ont révélé un réseau de régions cérébrales mobilisées lors de l'inhibition. C'est plus précisément à partir d'études en imagerie cérébrale qu'il a été possible de déterminer ce qui se passe dans le cerveau lorsqu'une erreur de raisonnement est inhibée et qu'une stratégie nouvelle est activée. Ces expérimentations sont basées sur des tâches où un conflit oblige à surmonter une stratégie spontanée. Les résultats de Bush *et al.* (1998) montrent que le cortex cingulaire antérieur (CCA) et le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) sont parmi les régions les plus activées pour inhiber. Des études similaires utilisant l'imagerie cérébrale confirment ces résultats, notamment celle de Leung, Skudlarski, Gatenby, Peterson et Gore (2000) qui ont identifié le CCA, le CPDL, en plus du cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL) qui serait la région la plus fortement associée à l'inhibition (Aron *et al.*, 2004 ; Aron *et al.*, 2014a ; Aron *et al.*, 2014b). Dans la recherche de MacDonald, Cohen, Stenger et Carter (2000), des résultats similaires ont été observés, soit que le CCA et le CPDL étaient plus activés lorsque la tâche requiert

d'inhiber. D'autres recherches (Lie, Specht, Marshall & Fink, 2006 ; Monchi, Petrides, Petre, Worsley & Dagher, 2001) ont également observé une activation significative du CCA, CPDL et CPVL lors de l'inhibition de réponses préalablement apprises. Buchsbaum, Greer, Chang et Berman (2005) confirment également ces résultats dans leur méta-analyse. Enfin, Menon, Adleman, White, Glover et Reiss (2001) ont observé que l'inhibition d'une réponse est associée surtout à l'activation du CCA, CPDL gauche et droit et du CPVL gauche et droit. Les recherches en imagerie cérébrale permettent donc d'associer l'inhibition à trois régions principales du cerveau : le CPVL, le CPDL et le CCA (Garavan, Ross, Murphy, Roche & Stein, 2002). Le CCA étant plus précisément associé à la détection d'un conflit et le cortex préfrontal (CPVL et CPDL) au contrôle cognitif subséquent (MacDonald *et al.*, 2000). La théorie du *conflict-monitoring* (Botvinick, Braver, Barch, Carter & Cohen, 2001, Botvinick, Cohen & Carter, 2004 ; Botvinick, 2007) abonde dans le même sens à savoir que le CCA signalerait l'erreur au cortex préfrontal qui lui serait plutôt responsable du contrôle cognitif.

## LE RÔLE DE L'IMAGERIE CÉRÉBRALE

Pour mieux comprendre les liens entre l'apprentissage des concepts contre-intuitifs en sciences et l'inhibition, d'autres recherches sont nécessaires. Des études pourraient notamment tenter de vérifier précisément si les élèves présentant un faible niveau de compréhension conceptuelle en sciences mobilisent moins que d'autres ayant un meilleur niveau de compréhension, des mécanismes cérébraux associés à l'inhibition lorsqu'ils doivent évaluer la valeur scientifique d'énoncés contre-intuitifs en sciences. Néanmoins, comme mentionné précédemment, il s'avère difficile de contribuer à mieux comprendre les processus liés à l'apprentissage des concepts scientifiques à l'aide des outils méthodologiques plus couramment utilisés dans les recherches en éducation tels que les questionnaires et les entrevues. En effet, la nécessité d'inhiber des conceptions erronées peut être masquée par les réponses, scientifiquement correctes, fournies par les élèves, parce que l'inhibition des conceptions erronées peut se produire de façon inconsciente. Pour vérifier s'il y a ou non inhibition, il n'est donc pas possible de se fier uniquement aux réponses fournies par les participants ou à l'explicitation de leur démarche de raisonnement.

Pour surmonter cette difficulté, il est possible d'avoir recours à une méthodologie basée sur les temps de réaction des participants (Kelemen & Rosset, 2009 ; Kelemen, Rottman & Seston, 2012 ; Lafortune, Masson & Potvin, 2012 ; Shtulman & Valcarcel, 2012 ; Potvin, P., Masson, S., Lafortune, S. & Cyr, G., 2014).

« *La mesure des temps de réaction est une méthode largement répandue en psychologie expérimentale. Le temps de réaction indique l'intervalle entre la présentation d'un stimulus et la réponse (qui consiste généralement à appuyer sur un bouton). La mesure est un indice du niveau de complexité du raisonnement mobilisé pour résoudre la*

*tâche. En général, un temps de réaction plus long indique un processus de raisonnement plus complexe.* » (Babai *et al.*, 2012, p. 764-765, traduction libre).

Encore peu utilisée en éducation, cette approche méthodologique courante en psychologie repose sur l'hypothèse que, s'il est nécessaire d'inhiber une réponse spontanée pour répondre correctement, le temps de réaction sera plus long que si l'inhibition n'est pas requise. Cette approche est intéressante, parce qu'elle permet de surmonter certaines limites des méthodologies traditionnelles, mais elle comprend aussi elle-même certaines limites. En effet, s'il est vrai que l'inhibition demande plus de temps pour répondre, un temps de réaction plus élevé ne signifie pas nécessairement qu'un processus d'inhibition est en jeu. En effet, un temps de réaction plus long peut indiquer l'utilisation d'une stratégie ou d'un raisonnement différent qui comporte des étapes supplémentaires ou des étapes qui requièrent plus de temps. De plus, la qualité de l'interprétation d'un temps de réaction plus long est largement tributaire de la qualité de la tâche cognitive utilisée et, surtout, de l'équivalence entre les différentes conditions impliquées dans la tâche. La méthode des temps de réaction est donc intéressante, parce qu'elle permet d'identifier la présence d'une différence dans le raisonnement nécessaire pour répondre entre deux types de questions, mais elle ne nous indique pas précisément et directement la nature de cette différence.

Pour mesurer plus directement la mobilisation de mécanismes cérébraux associés à l'inhibition, il est nécessaire d'avoir plutôt recours à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Utilisée depuis les années 90 en psychologie (Ogawa *et al.*, 1992 ; Kwong *et al.*, 1992), l'IRMf permet de mesurer les variations du taux d'oxygénation du sang causées par l'activité cérébrale lors de la réalisation de différentes tâches cognitives, dont l'évaluation de la valeur scientifique d'énoncés (Masson, Potvin, Riopel & Brault Foisy, 2012). En effet, grâce à l'émergence récente de connaissances sur le cerveau (OCDE, 2007b), notamment par les neurosciences cognitives, il est possible de mieux comprendre les mécanismes mobilisés par les élèves lors de tâches contre-intuitives en sciences. Cette méthodologie est particulièrement intéressante puisqu'elle permet de fournir des informations sur une variable, l'activité cérébrale des régions associées à l'inhibition, qui était jusqu'à tout récemment difficile à mesurer. De plus, l'utilisation d'appareils d'imagerie cérébrale permet de trianguler et de vérifier les résultats comportementaux obtenus par les recherches précédentes menées sur le changement conceptuel (Masson *et al.*, 2012).

## CONCLUSION

Les résultats de recherche disponibles à ce jour mènent à penser que l'expertise en sciences s'expliquerait en partie par une meilleure mobilisation de l'inhibition. Or, jusqu'à maintenant, les recherches qui ont tenté d'établir les liens directs entre les mécanismes cérébraux associés à l'inhibition et la compréhension des concepts contre-

intuitifs ont uniquement porté sur des sujets adultes, qui étaient novices ou experts en sciences. Toutefois, il serait également important de vérifier si, non seulement chez les experts adultes, mais également chez les élèves en formation, la compréhension des concepts scientifiques peut également être associée à la mobilisation de l'inhibition. Éventuellement, il pourrait découler de la vérification de cette hypothèse des recommandations sur les interventions pédagogiques à privilégier pour prévenir les difficultés de compréhension des concepts contre-intuitifs en science.

De tels résultats pourraient confirmer ou infirmer les différentes hypothèses sur les raisons expliquant pourquoi certains élèves démontrent une plus faible compréhension des concepts scientifiques. De plus, si l'inhibition se trouve effectivement associée au niveau de compréhension conceptuelle des élèves, cela signifierait pour les enseignants de sciences une double tâche à accomplir.

« [Ceux-ci] devraient non seulement aider leurs élèves à apprendre de nouveaux concepts scientifiques, mais ils devraient également aider ces derniers à apprendre à bloquer (ou contrôler) leurs anciennes théories non scientifiques pour parvenir à raisonner correctement dans certains contextes précis. » (Brault Foisy, 2013, p. 16)

Il est également intéressant de noter que, dans certains domaines comme l'apprentissage de la lecture et du calcul, les caractéristiques des élèves en difficulté sont déjà assez bien documentées, que ce soit d'un point de vue social, cognitif ou cérébral. Par exemple, les caractéristiques cérébrales des élèves atteints de dyslexie sont bien connues aujourd'hui. Par contre, dans le domaine des sciences, ce n'est pas le cas. En fait, nous ne savons pratiquement rien au sujet des élèves présentant des difficultés particulières en sciences. Conséquemment, les enseignants en français ou en mathématiques sont beaucoup mieux outillés que les enseignants de sciences pour comprendre les raisons expliquant pourquoi certains apprentissages dans leur domaine sont difficiles et, surtout, pourquoi certains de leurs élèves éprouvent plus de difficultés que d'autres.

En sciences, un certain engouement mène quelques équipes de recherche (par exemple Masson *et al.*, 2014 ; Stavy & Babai, 2010) à repousser les limites de nos connaissances actuelles sur les mécanismes cérébraux associés aux apprentissages conceptuels contre-intuitifs. Toutefois, cet effort de recherche est à ce jour insuffisant pour être en mesure de fournir des résultats probants et applicables pour les enseignants. Plus de résultats de recherches pourraient ouvrir la voie à des études plus appliquées qui auraient pour objectif d'identifier les types d'enseignement les plus susceptibles de favoriser la mobilisation de l'inhibition chez les élèves en difficulté. En effet, il existe à l'heure actuelle un bon nombre de programmes d'intervention visant spécifiquement le développement de l'inhibition (voir par exemple Houdé *et al.*, 2000). Dans des recherches ultérieures, si l'hypothèse du lien entre inhibition et compréhension conceptuelle est confirmée, il serait intéressant de vérifier si l'application de certains de ces programmes

contribue à une meilleure mobilisation de l'inhibition et à une meilleure compréhension conceptuelle.

En terminant, rappelons que la compréhension des concepts scientifiques n'est qu'un des aspects de l'apprentissage des sciences. D'autres apprentissages difficiles en sciences mériteraient d'être étudiés du point de vue des mécanismes cérébraux permettant de surmonter ces difficultés. C'est le cas d'apprentissages fondamentaux en sciences comme ceux de l'apprentissage du contrôle des variables (Babai & Levit-Dori, 2009), de l'apprentissage du raisonnement causal (Fugelsang & Dunbar, 2005) et de la formulation d'hypothèses (Lee & Kwon, 2012).

## RÉFÉRENCES

- ARON, A. R., ROBBINS, T. W. & POLDRACK, R. A. (2014a). Inhibition and the right inferior frontal cortex: one decade on. *Trends Cogn Sci* (0). doi: 10.1016/j.tics.2013.12.003
- ARON, A. R., ROBBINS, T. W. & POLDRACK, R. A. (2014b). Right inferior frontal cortex: addressing the rebuttals. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. doi: 10.3389/fnhum.2014.00905
- ARON, A. R., ROBBINS, T. W. & POLDRACK, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends Cogn Sci*, 8 (4), 170-177. doi: 10.1016/j.tics.2004.02.010
- BABAI, R. & LEVIT-DORI, T. (2009). Several CASE lessons can improve students' control of variables reasoning scheme ability. *Journal of Science Education and Technology*, 18 (5), 439-446.
- BABAI, R., EIDELMAN, R. & STAVY, R. (2012). Preactivation of inhibitory control mechanisms hinders intuitive reasoning. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 10 (4), 763-775. doi: 10.1007/s10763-011-9287-y
- BOTVINICK, M. (2007). Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 7 (4), 356-366.
- BOTVINICK, M. M., BRAVER, T. S., BARCH, D. M., CARTER, C. S. & COHEN, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108 (3), 624-652.
- BOTVINICK, M. M., COHEN, J. D. & CARTER, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends in Cognitive Sciences*, 8 (12), 539-546.
- BRAULT FOISY, L.-M., MASSON, S., POTVIN, P. & RIOPEL, M. (accepté). Using fMRI to compare cerebral activations between novices and experts in science during a task in mechanics involving a common misconception. *Trends in Neuroscience and Education*.
- BRAULT FOISY, L.-M. (2013). *Comparaison de l'activité cérébrale de novices et d'experts en sciences lors de la réalisation d'une tâche en physique mécanique impliquant une conception fréquente* (mémoire de maîtrise inédit, Université du Québec à Montréal, Canada).
- BROWN, D. E. (1993). Refocusing core intuitions: A concretizing role for analogy in conceptual change. *Journal of Research in Science Teaching*, 20, 1273-1290.
- BROWN, D. E. & HAMMER, D. M. (2008). Conceptual change in physics. Dans S. Vosniadou (Dir.), *International handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 768-768). New York: Routledge.
- BUCHSBAUM, B. R., GREER, S., CHANG, W.-L. & BERMAN, K. F. (2005). Meta-analysis of neuroimaging studies of the Wisconsin Card-Sorting task and component processes. *Human Brain Mapping*, 25 (1), 35-45.
- BUSH, G., WHALEN, P. J., ROSEN, B. R., JENIKE, M. A., MCINERNEY, S. C. & RAUCH, S. L. (1998). The counting stroop: An interference

- task specialized for functional neuroimaging - validation study with functional MRI. *Human Brain Mapping*, 6 (4), 270-282.
- CHAMBERS, C. D., GARAVAN, H. & BELLGROVE, M. A. (2009). Insights into the neural basis of response inhibition from cognitive and clinical neuroscience. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33 (5), 631-646. doi: 10.1016/j.neubiorev.2008.08.016
- COMMISSION EUROPÉENNE. (2001). *EUROBAROMETRE 55.2: Les Européens, la science et la technologie*.
- CLEMENT, J. (1993). Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 30 (10), 1241-1257
- DISSA, A. A. (2006). A history of conceptual change research: Threads and fault lines. In R. K. Sawyer (Ed.), *Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (pp. 265-281). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- DISSA, A. A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition. Dans D. Gentner & A. L. Stevens (Dir.), *Mental models* (pp. 15-33). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- DUIT, R. (2007). Science education research internationally: Conceptions, research methods, domains of research. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 3 (1), 3-15.
- FUGELSANG, J. A. & DUNBAR, K. N. (2005). Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking. *Neuropsychologia*, 43 (8), 1204-1213.
- GARAVAN, H., ROSS, T. J., MURPHY, K., ROCHE, R. A. P. & STEIN, E. A. (2002). Dissociable executive functions in the dynamic control of behavior: Inhibition, error detection, and correction. *NeuroImage*, 17, 1820-1829.
- HOLMES, G. (1938). The cerebral integration of the ocular movements. *British Medical Journal*, 2, 107-112.
- HOUDÉ, O. (2014). *Apprendre à résister*. Paris : Le Pommier.
- HOUDÉ, O. (2013). *La Psychologie de l'enfant* (6<sup>e</sup> éd.). Paris : Presses universitaires de France.
- HOUDÉ, O., ZAGO, L., MELLET, E., MOUTIER, S., PINEAU, A., MAZOYER, B. & TZOURIO-MAZOYER, N. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12 (5), 721-728.
- KARAGOZ, M. & CAKIR, M. (2011). Problem Solving in Genetics: Conceptual and Procedural Difficulties. *Educational Sciences: Theory & Practice*, 11 (3), 1668-1674.
- KELEMEN, D. & ROSSET, E. (2009). The human function compunction: teleological explanation in adults. *Cognition*, 111 (1), 138-143. doi: 10.1016/j.cognition.2009.01.001
- KELEMEN, D., ROTTMAN, J. & SESTON, R. (2012). Professional Physical Scientists Display Tenacious Teleological Tendencies: Purpose-Based Reasoning as a Cognitive Default. *Journal of Experimental Psychology: General*, No Pagination Specified. doi: 10.1037/a0030399
- KIM, E. & PAK, S.-J. (2002). Students do not overcome conceptual difficulties after solving 1000 traditional problems. *American Journal of Physics*, 70 (7), 759-765. doi: http://dx.doi.org/10.1119/1.1484151
- KWONG, K.K., BELLIVEAU, J.W., CHESLER, D.A., GOLDBERG, I.E., WEISSKOFF, R.M., PONCELET, B.P., KENNEDY, D.N., HALPEMET HALPEMET, E.F. & ROSEN, B.R., (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 89, 5675-5679.
- LAFORTUNE, S., MASSON, S. & POTVIN, P. (2012, May 24-26). *Does inhibition have a key role to play in overcoming intuitive interferences in science?* Communication présentée au Meeting of the Special Interest Group (SIG) 22 "Neuroscience and Education" of the European Association for Research on Learning and Instruction (EARLI), University of London, United Kingdom.
- LAUGKSCH, R. C. (2000). Scientific literacy: A conceptual overview. *Science Education*, 84 (1), 71-94.
- LEE, J.K. & KWON, Y. (2012). Learning-Related Changes in Adolescents' Neural Networks During Hypothesis-Generating and Hypothesis-Understanding Training. *Science & Education*, 21 (1), 1-31.
- LEUNG, H.-C., SKUDLARSKI, P., GATENBY, J. C., PETERSON, B. S. & GORE, J. C. (2000). An event-related functional MRI study of the Stroop color word interference task. *Cerebral Cortex*, 10 (6), 552-560.
- LIE, C. H., SPECHT, K., MARSHALL, J. C. & FINK, G. R. (2006). Using fMRI to decompose the neural processes underlying the Wisconsin Card Sorting Test. *NeuroImage*, 30 (3), 1038-1049.
- LIN, T.-C., LIN, T.-J. & TSAI, C.-C. (2013). Research Trends in Science Education from 2008 to 2012: A systematic content analysis of publications in selected journals. *International Journal of Science Education*, 1-27. doi: 10.1080/09500693.2013.864428
- LUBIN, A., VIDAL, J., LANOË, C., HOUDÉ, O. & BORST, G. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems: A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, 105 (3), 701.
- LURIA, A.R. (1966). *Higher Cortical Functions in Man*. London: Tavistock.
- MACDONALD, A. W., COHEN, J. D., STENGER, V. A. & CARTER, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, 288, 1835-1838.
- MASSON, S., POTVIN, P., RIOPEL, M. & 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.
- MASSON, S., POTVIN, P., RIOPEL, M., BRAULT FOISY, L.-M. & LAFORTUNE, S. (2012). Using fMRI to study conceptual change: Why and how? *International Journal of Environmental and Science Education*, 7 (1), 19-35.
- MENON, V., ADLEMAN, N. E., WHITE, C. D., GLOVER, G. H. & REISS, A. L. (2001). Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task. *Human Brain Mapping*, 12 (3), 131-143.
- MILLER, J. D. (2012). The Sources and Impact of Civic Science Literacy In M. W. Bauer, R. Shukla & N. Allum (Eds.), *The Culture of Science: How the Public Relates to Science Across the Globe*. New York: Routledge.
- MILLER, E.K. & COHEN, J.D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24.
- MILLS SHAW, K. R., VAN HORNE, K., ZHANG, H. & BOUGHMAN, J. (2008). Essay Contest Reveals Misconceptions of High School Students in Genetics Content. *Genetics*, 178 (3), 1157-1168. doi: 10.1534/genetics.107.084194
- MONCHI, O., PETRIDES, M., PETRE, V., WORSLEY, K. & 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. *The Journal of Neuroscience*, 21 (19), 7733-7741.
- NATIONAL SCIENCE FOUNDATION & NATIONAL CENTER FOR SCIENCE AND ENGINEERING STATISTICS (2010). *Science and engineering indicators: 2010*. Récupéré de : <http://www.nsf.gov/statistics/seind10/cs1.htm>
- NGSS LEAD STATES. (2013). *Next generation science standards*. Washington, DC: National Academies Press.
- OGAWA, S., TANK, D.W., MENON, R.S., ELLERMANN, J.M., KIM S. G., MERKLE, H. & UGURBIL, K. (1992). Intrinsic Signal Changes Accompanying Sensory Stimulation: Functional Brain Mapping With Magnetic Resonance Imaging. *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)*, 89, 5951-5955
- OCDE, Organisation de coopération et de développement économiques (2007a). *PISA 2006: Science competencies for tomorrow's world executive summary*. Récupéré de : <http://www.oecd.org/dataoecd/15/13/39725224.pdf>
- OCDE, Organisation de coopération et de développement économiques

- (2007b). *Understanding the Brain: The Birth of a Learning Science*. Récupéré de : <http://www.oecd.org/edu/ceeri/understandingthebrainthebirthofalearningscience.htm>
- POTVIN, P. (2013). Proposition for improving the classical models of conceptual change based on neuroeducational evidence: conceptual prevalence. *Neuroeducation*, 2 (1), 1-28.
- POTVIN, P., MASSON, S., LAFORTUNE, S. & 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*, 13 (1), 21-43. doi: 10.1007/s10763-014-9520-6
- ROBERTS, D. A. (2007). Scientific literacy/science literacy. In S. K. Abell & N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education* (pp. 729-780). New York: Routledge.
- STAVY, R. & BABAI, R. (2010). Overcoming intuitive interference in mathematics: Insights from behavioral, brain imaging and intervention studies. *ZDM: The International Journal on Mathematics Education*, 42, 621-633.
- STAVY, R. & TIROSH, D. (2000). *How students (mis-) understand science and mathematics: Intuitive rules*. New York: Teachers College Press.
- SHTULMAN, A. & VALCARCEL, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. *Cognition*, 124 (2), 209-215. doi: 10.1016/j.cognition.2012.04.005
- TIPPER, S. P. (2001). Does negative priming reflect inhibitory mechanisms? A review and integration of conflicting views. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 54 (2), 321-343.
- TIPPER, S. P. (1985). The negative priming effect: Inhibitory priming by ignored objects. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 37 (4), 571-590.
- WARD, J. (2010). *The Student's Guide to Cognitive Neuroscience*. Hove/ New York: Psychology Press.
- WENDT, J. L. & ROCKINSON-SZAPKIW, A. (2014). The effect of online collaboration on middle school student science misconceptions as an aspect of science literacy. *Journal of Research in Science Teaching*, 51 (9), 1103-1118. doi: 10.1002/tea.21169