

RECHERCHE EXPÉRIMENTALE

**Influence d'un entraînement de courte durée aux fonctions
exécutives, et particulièrement au contrôle inhibiteur, sur le
changement conceptuel en physique**

Cédric Vanhoolandt^{1*}, Charly Moberes¹ et Jim Plumet¹

RÉSUMÉ

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) a montré que certaines zones cérébrales associées aux fonctions exécutives sont davantage activées chez les experts que chez les novices dans différentes tâches scientifiques. Si plusieurs recherches en neuroéducation montrent que les fonctions exécutives sont impliquées dans un changement conceptuel établi sur une durée de quelques mois, peu d'études se sont néanmoins intéressées à leur action sur une période de temps plus courte ainsi qu'à la possibilité qu'un entraînement aux fonctions exécutives, et au contrôle inhibiteur en particulier, puisse avoir un impact sur le changement conceptuel sur cette période. En utilisant le Force Concept Inventory (FCI) en prétest et en post-test comme indicateur de la présence de préconceptions en mécanique newtonienne, l'objectif de cette recherche est d'une part de vérifier l'implication du contrôle inhibiteur sur leur maintien dans le temps lors d'un cours propédeutique d'une semaine en physique et destiné à des élèves projetant des études supérieures à caractère scientifique dans une université francophone belge. D'autre part, nous investiguons les bénéfices d'un entraînement neurocognitif de 4 occurrences d'environ 10 minutes utilisant le Wisconsin Card Sorting Test (WCST) sur cette période et auquel 50 élèves ont pris part activement sur les 85 volontaires ayant accompli l'étude jusqu'au bout (prétest, cours propédeutique et post-test). Nos résultats suggèrent que des individus ayant des capacités d'inhibition plus développées ont effectué un meilleur changement conceptuel en physique, malgré que certaines préconceptions restent toujours fortement ancrées même après le cours. Une différence en fonction du genre des individus est également observée au niveau du changement conceptuel. Nos résultats soutiennent que les fonctions exécutives, et le contrôle inhibiteur en particulier, sont sollicitées dans le processus de changement conceptuel en physique même sur un temps aussi court qu'une semaine.

¹ Université de Namur, IRDENa, Laboratoire de didactique de la physique, Namur, Belgique

* Adresse courriel de l'auteur principal : cedric.vanhoolandt@unamur.be

Pour citer cet article : Vanhoolandt, C., Moberes, C. et Plumet, J. (2023). Influence d'un entraînement de courte durée aux fonctions exécutives, et particulièrement au contrôle inhibiteur, sur le changement conceptuel en physique. *Neuroeducation*, 7(1), 39-61.

DOI : <https://doi.org/10.24046/neuroed.20210701.39>

Reçu le 11 janvier 2022. Forme révisée reçue le 15 juin 2022.

Accepté le 14 novembre 2022. Disponible en ligne le 26 janvier 2023.

Neuroeducation, 7(1), 39-61

ISSN : 1929-1833

All rights reserved © 2023 - Association pour la recherche en neuroéducation / Association for Research in Neuroeducation

1. Introduction

1.1. Les préconceptions

Depuis de nombreuses années, les chercheurs et les enseignants ont constaté chez les élèves que certaines notions semblent plus difficiles à maîtriser que d'autres (diSessa, 2014). Ceci est particulièrement vrai en sciences où certaines préconceptions associées à ces notions semblent constituer de réels obstacles à l'apprentissage pour les élèves, et ce de manière assez systématique. Une littérature abondante dans le domaine de l'apprentissage des sciences montre ainsi que plusieurs concepts scientifiques restent mal compris, et ce même après enseignement (Duit, 2009 ; Driver et al., 2015). Parmi les causes avancées par les chercheurs pour expliquer ces difficultés, l'existence de conceptions naïves fausses présentes chez les élèves qui interfèrent avec l'apprentissage est l'une des causes centrales invoquées (Carey, 2000 ; Liu, 2001 ; Potvin, 2019). À proprement parler, ces préconceptions ne sont pas une propriété des individus mais sont mobilisées par ceux-ci lors de leur raisonnement (Tiberghien, 1997). Un élève donné peut, dès lors, faire état de conceptions très différentes les unes des autres, contradictoires ou pas, correctes ou pas (Taber, 2000). Enfin, il a été montré que ces préconceptions peuvent être extrêmement persistantes à tout apprentissage (Brown et Hammer, 2009) et fortement ancrées chez l'élève ce qui fait en sorte, dans une certaine mesure, qu'elles résistent à l'enseignement des connaissances scientifiques. Cependant, ces conceptions fausses que possèdent les élèves ne sont pas toutes aussi tenaces et certaines peuvent évoluer et faire place à des savoirs scientifiques (Potvin, 2013 ; von Aufschnaiter et Rogge, 2010).

Une préconception est donc une conception erronée qui contredit partiellement ou totalement une connaissance scientifique que l'école cherche à enseigner (Masson, 2007). Cela ne signifie pas pour autant que la notion invoquée soit absurde ou dépourvue de toute logique. En effet, cette dernière, tout comme une conception scientifique, permet d'expliquer ou de prédire un ensemble de phénomènes – bien souvent incorrect du point de vue scientifique – mais qui peut apparaître cohérent chez un individu. Ces préconceptions forment un ensemble d'idées et de croyances du monde sont bien souvent issues de raisonnements influencés par le sens commun et des heuristiques (Taber, 2014 ; Talanquer, 2006). Selon ces auteurs, on entend ici par heuristique une stratégie de résolution rapide de problème qui ne se base pas sur un raisonnement rationnel. Bien que l'utilisation d'heuristiques peut s'avérer efficace dans le quotidien, ces dernières peuvent aussi entraîner l'émergence de nouvelles conceptions erronées chez les élèves lorsqu'ils ne parviennent pas à en identifier les limites de validité. Ces stratégies de résolution rapide de problèmes peuvent prendre la forme d'un principe ou d'une idée mettant en jeu plusieurs concepts (Masson, 2007). En pratique, ceux-ci

peuvent être explicités par les élèves au travers de justifications ou induits par le chercheur ou l'enseignant sur base de réponses, raisonnements et prédictions faites par les élèves. À titre d'exemple en mécanique classique, on rencontre la préconception qu'il y a quelque chose, souvent appelé force, à l'intérieur d'un objet en mouvement (Driver et al., 2015). Avec cette préconception, on peut notamment prédire que les objets qui se déplacent s'arrêteront quand la force de leur mouvement sera épuisée, tel le carburant dans un réservoir. Les phénomènes suivants – incorrects du point de vue scientifique – peuvent également être expliqués par cette préconception : s'il y a un mouvement, alors il y a une force ; s'il n'y a pas de mouvement, alors il n'y a pas de force ; il ne peut y avoir de force sans mouvement, etc.

En physique, le recours à ces heuristiques est particulièrement fréquent et mène bien souvent à des conceptions erronées. La physique apparaît ainsi comme une discipline scientifique possédant une grande quantité de préconceptions persistantes (Brown et Hammer, 2009). Chacune de ces conceptions erronées est autant d'obstacles que les élèves doivent surmonter de manière à raisonner correctement en physique. Dans la littérature, ces obstacles ont été répertoriés dans diverses branches de la physique allant de la mécanique classique à la mécanique quantique en passant par l'électromagnétisme et la physique des fluides (Babai et Amsterdamer, 2008 ; Brault Foisy et al., 2015 ; Halloun et Hestenes, 1985 ; Masson et al., 2014 ; Potvin et al., 2015 ; Stein et al., 2008 ; Styer, 1996).

Enfin, la mécanique classique apparaît comme un domaine de la physique particulièrement propice à l'utilisation d'heuristiques (Andersson et Runeson, 2008 ; Cohen, 2006 ; Runeson et al., 2000). En effet, si la mécanique de Newton permet d'expliquer la plupart des mouvements que l'on peut observer au quotidien, les élèves, à force de côtoyer ces phénomènes, développent aussi des modèles alternatifs ayant pour objectif d'appréhender le monde dans lequel on vit sur base de leurs observations. Ces préconceptions leur permettent d'automatiser certains raisonnements en donnant lieu à des intuitions et dans le cas de la mécanique, ces dernières sont malheureusement souvent erronées. Un des défis majeurs posés par l'étude de la mécanique est que la compréhension de ses lois nécessite un changement radical pour un apprenant dans sa manière d'appréhender le monde (Martín-Blas et al., 2010). Ainsi, si dans le quotidien, on observe la plupart du temps qu'un objet est en mouvement parce qu'il est poussé par quelque chose ou quelqu'un, il est dès lors facile d'inférer à partir de ces observations qu'il faut nécessairement exercer une force sur un objet pour que celui-ci soit en mouvement. Chaque nouvelle observation confirmant ce « principe » vient alors la renforcer et l'automatiser de manière à former une intuition, une heuristique. Malheureusement, cette heuristique ne possède qu'un domaine de validité qui est limité, ce qui la rend

incorrecte de manière générale et se heurte à l'apprentissage du principe d'inertie.

Dès lors, de par son caractère contre-intuitif, la mécanique classique est donc un domaine particulièrement propice à l'étude des préconceptions des élèves. Cet élément est d'autant plus pertinent dans un cours de physique introductif à destination d'étudiants primo-arrivants à l'université. En effet, lors de cette transition particulièrement périlleuse vers un enseignement plus abstrait (Paivandi, 2015), il est indispensable que ces préconceptions soient identifiées dans le but d'assurer une transition d'un mode de pensée non systématique et mobilisant les préconceptions et les heuristiques des étudiants vers un raisonnement logique et donc newtonien.

1.2 Les raisonnements logiques, le contrôle inhibiteur et le genre

Sur la base de nombreuses études préalables dans le champ de la psychologie cognitive, Kahneman (2012) modélise le fonctionnement du cerveau via deux systèmes de pensée qui cohabitent : le système 1, aussi appelé système heuristique, qui est rapide, intuitif et émotionnel et le système 2, aussi appelé système algorithmique, qui est lent, réfléchi et logique. Selon l'auteur, si certains raisonnements sont systématiquement faux, ce n'est pas que le système 2 ne fonctionne pas correctement, mais plutôt que le système 1 prend régulièrement le pas sur le système 2 en le court-circuitant. En effet, le système 1 rapide, intuitif et émotionnel, fonctionne automatiquement et rapidement, avec peu ou pas d'effort tandis que le système 2 est plus lent, plus réfléchi, plus contrôlé et plus logique. Il est souvent associé à l'expérience subjective de l'action, du choix et de la concentration (Kahneman, 2012). Sachant que les enfants et les adultes utilisent spontanément leur système heuristique, l'inhibition de ce système – par le cortex préfrontal – est donc critique pour éviter des erreurs quand des heuristiques inadéquates interfèrent avec un raisonnement algorithmique (Borst *et al.*, 2015; Houdé *et al.*, 2000). Cette capacité qui caractérise le contrôle inhibiteur est directement liée à la maturation du cortex préfrontal, maturation qui continue à travers l'enfance et l'adolescence. Le temps de l'adolescence, jusqu'au début de l'âge adulte, est en effet une période où des changements substantiels s'opèrent, tant du point de vue neurobiologique que comportemental (Dennis et Thompson, 2013; Giedd, 2008).

Être capable d'inhiber une heuristique qui se trouve être intuitive et efficace dans la plupart des cas de la vie courante, au profit d'une stratégie correcte et fiable, mais plus lente, représente un réel défi pour tous les individus. Pour y arriver, le cerveau doit être capable de faire appel à un ensemble d'aires cérébrales différentes de celles habituellement utilisées dans la réalisation d'une tâche particulière. C'est précisément ce qui a été observé dans le cadre d'une étude en neuroéducation menée par Houdé et ses collaborateurs (2000). Dans celle-ci, les chercheurs ont observé, à l'aide de

l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), un déplacement de l'activation des aires cérébrales de la partie postérieure du cerveau vers la partie préfrontale gauche notamment. Ce déplacement s'est opéré après que des individus aient appris à raisonner de manière logique dans une tâche pour laquelle ils raisonnaient initialement de manière intuitive. De telles données de neuroimagerie permettent de mieux comprendre le fonctionnement du cerveau et plus particulièrement dans ce cas-ci, d'identifier des réseaux neuronaux spécifiques à certains types de raisonnements.

Pour raisonner, des processus mentaux spécifiques sont donc mobilisés mais également d'autres, plus généraux. Ces processus de haut niveau permettant à un individu de raisonner, de résoudre des problèmes et de planifier des actions sont regroupés au sein d'une famille de processus appelée les fonctions exécutives. Traditionnellement, ces dernières possèdent trois éléments principaux : l'inhibition présentée ci-avant mais également la mémoire de travail et la flexibilité mentale (Diamond, 2013). La mémoire de travail a pour fonction de maintenir activement des informations et de les manipuler pendant quelques dizaines de secondes pour atteindre un but défini a priori (Diamond et Ling, 2019) tandis que la flexibilité mentale peut être définie comme étant la capacité à changer de tâche ou de stratégie mentale, une compétence particulièrement impliquée dans la résolution de problèmes (Masson et Borst, 2017). En effet, elle permet à l'individu d'adapter ses choix aux contingences de la tâche. De manière générale, les fonctions exécutives sont essentielles pour la réussite tant académique que dans la vie de tous les jours et l'inhibition est l'un des éléments principaux de ces fonctions exécutives (Diamond, 2013).

Si la réussite académique est abordée, dès lors que cette recherche se situe dans le champ des sciences physiques, il est manifeste de constater que les garçons montrent généralement de meilleures performances aux tests de sciences que les filles, même parmi les élèves qui ont un parcours identique en math et sciences, et ce depuis plusieurs décennies (Hedges et Nowell, 1995; Kahle, 1994). Dans leur méta-analyse récente, Reilly *et al.* (2015) soutiennent que, même si elles sont faibles, des différences de résultats existent systématiquement en sciences et en mathématiques en faveur des garçons. Particulièrement en sciences, ces auteurs indiquent aussi que les performances des filles et des garçons sont équivalentes pour les sciences biologiques mais pas pour les sciences physiques. Ces différences ne semblent pas être modulées en fonction des années (de 1990 à 2011), ce qui indique une certaine constance de ces résultats en fonction du temps, particulièrement en fin de secondaire. Les performances des garçons semblent aussi plus variables que celles des filles.

En Belgique, l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) annonce que le taux de réussite des garçons au concours d'entrée en médecine et en dentisterie est

supérieur à celui des élèves filles pour l'ensemble des épreuves, et ce, plus particulièrement en physique (ARES, 2021). Cet écart entre les genres a également été observé, dans plusieurs pays, pour les niveaux d'enseignement secondaire et supérieur (Erikson et Erikson, 1984; Hake, 1998; Labudde *et al.*, 2000; Mears, 2019; Zohar et Sela, 2003) : le score moyen des filles est systématiquement plus bas que celui des garçons. Certaines de ces études concernent spécifiquement l'analyse des réponses données à des questions tirées du questionnaire Force Concept Inventory (FCI) développé par Hestenes (Hestenes *et al.*, 1992) qui est largement utilisé pour analyser les effets d'un cours sur la compréhension de la mécanique newtonienne (Mears, 2019). Plusieurs chercheurs (Dietz *et al.*, 2012; Docktor *et al.*, 2008; Traxler *et al.*, 2018;) ont tenté d'expliquer que ce questionnaire pourrait spécifiquement contenir un biais de genre, sans toutefois ne jamais parvenir à l'établir clairement.

Le FCI, emblématique de ce que les Anglo-saxons appellent inventaires de conceptions, permet de quantifier l'évolution des préconceptions. Pour ce faire, il est nécessaire qu'une modélisation soit explicitée et c'est à ce niveau qu'intervient la didactique.

1.3 Le changement conceptuel

La didactique a, de fait, proposé plusieurs modèles qui tentent d'expliquer l'évolution des préconceptions des élèves et parmi ceux-ci, celui du changement conceptuel. Ce dernier peut être défini comme le processus permettant à un individu de passer d'une préconception, vers une conception scientifiquement correcte. Une équipe de chercheurs (Potvin *et al.*, 2020) a récemment réalisé une méta-analyse de ce champ de recherche en relevant un important nombre d'articles sur le sujet. Une liste de 86 modèles de changement conceptuel y est présentée ainsi qu'une hiérarchisation de ces derniers. Par ailleurs, comme mentionné par Potvin (2019), l'ensemble de ces modèles peuvent être classés en trois grandes catégories dont l'ordre correspond à leur évolution historique : (1) les modèles de remplacement des préconceptions, dont celui de Posner *et al.* (1982) est sans doute un des plus emblématiques. Ces modèles consistent en une organisation centrale et organisée des conceptions, passant d'un ensemble de conceptions à un autre, incompatible avec le premier. (2) Les modèles de transformation des préconceptions, tels que celui de Vosniadou (1994). Pour ceux-ci, le changement conceptuel consiste en une modification graduelle des modèles mentaux du monde physique qui se termine soit par leur enrichissement soit par leur révision. (3) Les modèles de coexistence des préconceptions. Pour ceux-ci, les préconceptions demeurent et les explications scientifiques s'ajoutent à elles.

Ces différents modèles font appel à des mécanismes distincts. Bien que les deux premiers modèles soient très populaires et

aient permis d'approfondir les connaissances sur la manière dont le processus de changement conceptuel se produit, ils ont aussi été critiqués, notamment par le fait que ces recherches aient traditionnellement porté sur l'apprentissage d'objets ou de performances qui sont plutôt étrangers à ceux enseignés en classe. De fait, différents dispositifs d'apprentissage basés sur ces modèles de changement conceptuel se sont répandus dans les années 1990 mais, assez rapidement, ces dispositifs ont montré leurs limites. Ainsi, Peterfalvi et Vérin (1996) ont identifié plusieurs dérives de ce type de scénarii pédagogiques. Face à des situations problèmes qui viennent perturber les raisonnements intuitifs des élèves, ces derniers éprouvent de l'étonnement, de l'inconfort voire de l'inquiétude. À terme, en multipliant ce genre de situations où l'élève se trouve en difficulté, le risque est alors grand que s'installe un sentiment d'incompétence et que l'élève vienne à penser que les sciences sont trop compliquées et se mette à les rejeter.

À l'issue de ces réflexions, les neurosciences ont permis l'émergence de nouvelles approches, comme le modèle de prévalence conceptuelle (Potvin, 2013). De fait, celles-ci proposent d'apporter un éclairage supplémentaire au processus de changement conceptuel, à partir de l'analyse des données cérébrales obtenues au moyen de techniques d'imagerie, telle que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf).

1.4 L'apport des neurosciences

Les récentes avancées dans le domaine des neurosciences permettent en effet aujourd'hui de visualiser, voire de mesurer, les processus cérébraux liés à l'apprentissage. Ces nouvelles techniques offrent donc de nouvelles façons de concevoir le changement conceptuel (Masson *et al.*, 2012), et ce notamment à travers le champ de la neurodidactique des sciences (Masson, 2007).

D'emblée, il apparaît complexe de réaliser des études longitudinales portant sur le changement conceptuel pour lesquelles l'activité cérébrale d'élèves est mesurée tout au long de leur apprentissage. Par conséquent, les chercheurs en neurosciences cognitives ont souvent opté pour des études transversales comparant les différences qui pourraient exister au niveau de l'activité cérébrale entre des experts et des novices. Il est, a priori, supposé que l'individu expert ait achevé le processus de changement conceptuel. À l'inverse, on considère comme novice un individu n'ayant pas réalisé de changement conceptuel et donc susceptible de faire appel de manière récurrente à ses préconceptions. Dans ce cadre, on comprend donc qu'un expert réponde systématiquement de manière correcte à une question susceptible de mobiliser une préconception donnée.

Un nombre grandissant d'études investiguent les différences d'activation cérébrale entre des experts et des novices lors de tâches scientifiques impliquant des préconceptions (Potvin,

2013). Plusieurs recherches visent l'étude d'une préconception donnée, par exemple : les choses mobiles sont vivantes (Babai *et al.*, 2010), ce qui peut être versé est toujours un liquide (Babai et Amsterdamer, 2008), les objets plus lourds tombent plus vite [dans le vide] (Masson *et al.*, 2014), un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule électrique (Brault Foisy *et al.*, 2015) mais aussi dans d'autres domaines scientifiques comme l'ont investigué d'autres chercheurs (Allaire-Duquette, 2018 ; Malenfant-Robichaud, 2018 ; Shtulman et Valcarcel, 2012).

Il ressort de ces études que les experts activent significativement plus certaines aires cérébrales couramment associées à l'inhibition, particulièrement le cortex préfrontal ventrolatéral et le cortex préfrontal dorsolatéral. Dans certains cas, une zone appelée le cortex cingulaire antérieur et associée à la détection de conflit (Botvinick, 2007) est aussi plus fortement activée chez les experts que chez les novices. Des résultats récents (Allaire-Duquette *et al.*, 2019) confirment encore une activation plus forte de ces zones cérébrales chez les étudiants présentant un niveau élevé de compétence scientifique si on les compare à ceux qui le sont moins, même s'ils ont reçu une formation scientifique comparable. Une très récente étude utilisant la neuroimagerie (Allaire-Duquette *et al.*, 2021) révèle enfin que ces régions cérébrales liées au contrôle inhibiteur demeurent plus activées même chez des sujets ayant terminé un Ph. D. en physique.

D'une manière générale, et ce pour différentes branches scientifiques, il apparaît au travers de ces études que, lorsqu'ils raisonnent, les experts et les novices mobilisent des zones cérébrales différentes avec des niveaux d'activation différents et ces observations sont mises en avant par les techniques d'IRMf. De plus, il est possible d'observer que les experts, bien qu'ayant réalisé un changement conceptuel, activent encore des zones couramment associées à l'inhibition, ce qui peut paraître étonnant. En effet, pourquoi un expert a-t-il besoin de faire preuve d'inhibition pour résister à une certaine préconception pour répondre correctement ? Ces études montrent dès lors que, même chez les experts, les préconceptions et les conceptions scientifiques coexistent. Ainsi, être un expert ne signifierait pas remplacer une préconception par une conception scientifique, mais plutôt, au moyen de processus tel que l'inhibition et la détection d'erreurs, d'inhiber la mobilisation d'une préconception pour simultanément sélectionner le savoir scientifique correct.

D'autres types d'études utilisant les temps de réaction (Potvin *et al.*, 2015) sur le concept de flottaison semblent suggérer elles aussi qu'un conflit au niveau cérébral existe toujours, et ce même après avoir produit une réponse correcte. De fait, la production d'une réponse correcte est associée à des temps de réaction différents suivant que la question est considérée comme « intuitive » ou « contre-intuitive ». Cette différence

de temps de réponse est le signe qu'une conception erronée interfère toujours avec la connaissance correcte et a dû être inhibée de manière à produire une réponse correcte, ce qui augmente le temps de réaction. Des résultats étayant cette hypothèse ont été obtenus dans différentes études portant sur des domaines différents (Babai et Amsterdamer, 2008 ; Babai *et al.*, 2010 ; Shtulman et Valcarcel, 2012).

1.5 Le modèle de prévalence conceptuelle

Au vu de ces résultats issus des neurosciences cognitives, le modèle du changement conceptuel dit de prévalence (Potvin, 2013) suppose donc la coexistence de plusieurs conceptions (préconceptions et conceptions scientifiques). Il n'est dès lors plus question d'un remplacement d'un concept par un autre, mais plutôt d'une forme de compétition entre différents concepts qui coexistent. Le processus d'apprentissage devient alors un surpassement de certaines conceptions au détriment d'autres, considérées comme en interférence avec les buts pédagogiques identifiés. Cela implique que chaque conception peut être plus ou moins « ancrée » dans l'esprit d'un individu et donc posséder un statut plus ou moins important.

Selon Potvin et Cyr (2017), on peut dès lors considérer que l'adhésion à un concept est élevée lorsque dans des contextes distincts, un individu privilégie l'utilisation d'un concept par rapport à un autre. La réussite plus fréquente à des tâches congruentes/intuitives et l'échec plus fréquent à des tâches incongruentes/contre-intuitives sont aussi un indicateur d'une adhésion forte à une conception. Au vu de ce modèle, l'objectif de l'apprentissage est alors de parvenir à une prévalence durable d'une conception scientifique correcte au détriment d'une préconception. Ceci nécessite le renforcement de l'adhérence à la conception voulue et l'inhibition de la préconception. C'est donc à ce niveau que l'inhibition joue un rôle crucial. Une étude récente (Thibault et Potvin, 2018) met d'ailleurs en lumière ce rôle de l'inhibition en tant que prédicteur du changement conceptuel en physique sur un cours de 15 semaines pour des étudiants en génie. Précédemment, Kwon et Lawson (2000) ont obtenu un résultat similaire en montrant que la capacité d'inhibition est un bon indicateur du changement conceptuel, plus encore que d'autres variables telles que le raisonnement scientifique, les capacités mentales ou de planification, et ce sur une période similaire.

1.6 Un entraînement aux fonctions exécutives, et en particulier au contrôle inhibiteur, de courte durée

Du point de vue de l'imagerie cérébrale, il est difficile de déterminer le réseau cérébral précis impliqué dans une fonction exécutive (Masson et Borst, 2017). De fait, la résolution de tâches de flexibilité mentale sollicite l'activation de régions cérébrales associées à la mémoire de travail ou à l'inhibition, telles que le cortex cingulaire antérieur et le

cortex préfrontal dorsolatéral (Monchi *et al.*, 2001), zones qui sont aussi celles activées lors de la passation du test Wisconsin Card Sorting Test (WCST) (Lie *et al.*, 2006). Il faut aussi tenir compte que mesurer les fonctions exécutives séparément l'une de l'autre n'est pas toujours aisé. Plusieurs études montrent en effet que les fonctions exécutives sont partiellement distinctes mais corrélées (Lehto *et al.*, 2003; Miyake *et al.*, 2000). Néanmoins, le WCST apparaît comme un test pertinent pour caractériser finement différents aspects des fonctions exécutives (Jones, 2021).

En outre, de nombreux auteurs (Cortés Pascual *et al.*, 2019; Diamond et Ling, 2019; Ramos-Galarza *et al.*, 2019) s'accordent sur l'idée que les compétences des fonctions exécutives chez les enfants et les adolescents prédisent des facteurs humains importants, tels que les performances académiques. Dès lors, cela nourrit un grand intérêt dans des interventions ayant pour but de développer ces fonctions exécutives et de nombreuses études montrent que des programmes d'intervention ciblés peuvent améliorer ces fonctions exécutives (Diamond et Ling, 2019; Smid *et al.*, 2020). Parmi ces interventions, on relève notamment les recherches de Bellack *et al.* (2001) qui ont utilisé un entraînement au WCST. Dans cette étude, une batterie de tests a été administrée à tous les participants (en prétest et post-test) tandis qu'un groupe expérimental a en plus spécifiquement été entraîné au WCST sur une période de temps très courte (2 jours). À l'issue, les chercheurs montrent que le groupe expérimental a bénéficié de l'entraînement au WCST et a mieux performé à la batterie de tests. Cette étude montre que c'est chez les participants entraînés au WCST, même durant un temps limité, que l'on retrouve significativement le plus de transfert vers des tâches non entraînées. Une autre étude (Delalande *et al.*, 2020) porte sur un entraînement à l'inhibition utilisant une tâche de Stroop et de Stop-Signal pendant cinq semaines. Si aucune évolution significative des fonctions exécutives telles que mesurées par ces tests n'a pu être montrée par les chercheurs, ils ont néanmoins observé de subtiles modifications structurales au niveau du cerveau qui ont, selon eux, été induites par cet entraînement à l'inhibition. Ce type d'entraînement aurait donc un réel effet sur le cerveau, même s'il est modéré.

Actuellement, la question des effets d'un entraînement aux fonctions exécutives, et du contrôle inhibiteur en particulier, et de ses transferts potentiels vers d'autres tâches, liées aux sciences et aux mathématiques, chez les adolescents et les jeunes adultes, est une question pour laquelle il ne semble pas encore y avoir de consensus (Brookman-Byrne *et al.*, 2018; Maraver *et al.*, 2016; Vosniadou *et al.*, 2018; Wilkinson *et al.*, 2020).

Bien que la capacité d'inhibition mesurée par le WCST ait été utilisée par plusieurs auteurs en neuroéducation et malgré que son utilisation comme outil d'entraînement semble donner des résultats, même sur une période de temps limitée,

il semble paradoxalement que la modalité d'entraînement de cette fonction exécutive par cette tâche n'ait jamais été analysée. Par conséquent, la présente recherche vise à combler ce manque, en analysant d'une part un processus de changement conceptuel en mécanique newtonienne sur un temps très court et, d'autre part, l'impact d'une modalité d'entraînement aux fonctions exécutives pendant cette durée.

1.7 Questions et hypothèses de recherche

C'est dans ce cadre théorique que s'inscrit notre recherche. Comme la mécanique classique est une branche de la physique qui favorise l'utilisation de stratégies de résolution intuitives plutôt que des raisonnements logiques, cette dernière permet l'étude de la mobilisation des préconceptions. Par mobilisation, nous entendons la capacité, pour les apprenants, à convoquer des conceptions premières – fausses – en physique lors de la résolution de problèmes. Plus particulièrement, c'est le lien entre la capacité d'un apprenant à inhiber la convocation de préconceptions qui sera investigué au travers des questions de recherche qui suivent.

Existe-t-il un lien entre la capacité des élèves à inhiber la mobilisation de ces préconceptions et l'évolution de leur changement conceptuel en mécanique au terme d'une semaine propédeutique ?

En quoi un dispositif permettant d'entraîner les fonctions exécutives, et particulièrement l'inhibition, des apprenants leur permet-il d'améliorer la capacité à résister à mobiliser leurs conceptions premières fausses pour traiter des questions de physique ? Autrement dit, l'entraînement des fonctions exécutives visant à limiter l'usage de l'intuition à travers une activité qui n'a a priori rien de commun avec la physique, permet-elle d'améliorer la mise en œuvre du changement conceptuel chez les apprenants ?

En lien avec ces questions, nous formulons les hypothèses suivantes :

1-Un entraînement aux fonctions exécutives même pendant une période de très courte durée montrera des résultats observables en termes d'évolution du changement conceptuel en mécanique.

2-L'évolution du changement conceptuel en mécanique mesuré par la mobilisation des conceptions premières sera liée à l'utilisation de ses fonctions exécutives, et en particulier de l'inhibition.

3-Par la mesure de la mobilisation des conceptions premières en mécanique, il sera possible d'observer une différence de performance en fonction du genre fille/garçon.

2. Méthodologie

2.1 Participants et description générale

L'étude s'est déroulée dans le cadre d'une semaine de cours propédeutique destiné à revoir les concepts de base en physique dans une université francophone en Belgique. Les participants ($n = 180$) à cette étude, tous volontaires, sont décrits dans le Tableau n° 1. Tous diplômés de l'enseignement secondaire, ils se destinent à des études supérieures scientifiques (p. ex., biologie, chimie, physique). Néanmoins, de par la spécificité du système scolaire belge, ces futurs étudiants ont des profils différents du point de vue de leur formation initiale en sciences. En effet, dans le système scolaire belge, il n'existe aucune évaluation certificative externe (de type baccalauréat) prévue en fin de secondaire. Enfin, à l'exception des études de médecine ou d'ingénieur à l'université, aucun examen d'entrée ni concours d'accès n'est prévu. Par conséquent, même si la plupart des concepts étudiés au cours propédeutique devaient avoir été acquis préalablement, les connaissances et compétences des participants peuvent s'avérer très variables, notamment en fonction de leur école, de leur choix d'option, etc.

Tableau 1. Caractérisation des participants à l'étude.

	n	Âge (ans)	
		M	ET
Participants	180	18,23	1,64
Filles	96	18,22	1,95
Garçons	84	18,25	1,20

n = le nombre de participants, M = la moyenne et ET = l'écart-type

Pour des raisons d'organisation, ces étudiants ont été regroupés en sept groupes constitués de près de 26 élèves.

2.2 Déroulement général de l'étude

Pour évaluer la maîtrise des concepts de base en physique, et plus particulièrement en mécanique newtonienne, chez les participants, un test standardisé a été utilisé. Il s'agit du Force Concept Inventory ou test FCI (Hestenes *et al.*, 1992). Ce test a été proposé à l'ensemble des élèves lors d'un prétest en début de semaine et à la fin de la semaine, comme posttest. Selon les recommandations des auteurs (Hestenes *et al.*, 1992), le temps donné aux élèves pour réaliser le test FCI est de 30 minutes.

Lors du prétest, différentes informations ont été demandées aux participants pour caractériser leur profil telles que leur option scientifique lors de leurs deux dernières années du secondaire (sciences 3 h/semaine ou moins; sciences 6 h/semaine ou plus), leur genre, leur âge, leur participation éventuelle à une autre semaine de cours propédeutique.

Chacun des sept groupes mentionnés ci-dessus a par la suite assisté, dans un ordre différent, à des modules de cours de physique (8 modules de 3 h et une demi-journée de méthodologie universitaire) dans diverses branches de la physique (mécanique, électricité, électromagnétisme, optique ondulatoire, thermodynamique) et a participé à des travaux pratiques (une séance de laboratoire). Chaque module (dont celui de mécanique) a donc été pris en charge par le même enseignant, dans un local qui lui était assigné. Tous les participants ont donc reçu le même enseignement, à l'échelle de la semaine. Le contenu disciplinaire associé à chaque module est celui habituellement acquis au terme du secondaire (option sciences générales, c'est-à-dire 6 h/semaine ou plus). Cependant, du fait de la disparité des formations à l'issue de l'enseignement secondaire belge, chaque enseignant revoit les points essentiels jugés comme prérequis pour aborder plus sereinement l'enseignement supérieur. En mécanique, c'est la cinématique et la dynamique qui ont été abordées. Enfin, tous les enseignants ont reçu la consigne de ne pas discuter les questions du test FCI avec les étudiants.

Parallèlement à ces modules de physique, une partie du groupe (le groupe test) a participé, durant les pauses organisées en matinée (15 min) à un entraînement aux fonctions exécutives consistant en la passation d'un test WCST, d'une durée approximative de 10 min, sur une tablette numérique, et ce chaque jour de la semaine (sauf le mercredi). Quant aux élèves du groupe contrôle, il ne leur a pas été proposé d'entraînement supplémentaire spécifique ou d'exercices supplémentaires liés au cours, celui-ci étant une variable contrôlée de l'étude. Les chercheurs ont demandé aux enseignants d'utiliser ce temps (10 min) à encourager les élèves dans les études supérieures par des discussions de réflexion, de logique ou de méthodologie.

Pour des raisons liées à la participation libre au cours propédeutique (facultatif pour les élèves), le post-test organisé en fin de semaine n'a pas pu être rendu obligatoire. Dès lors, on a pu observer une érosion progressive mais nette du nombre d'élèves au cours de la semaine de cours propédeutique. Lors du post-test, 85 élèves sur les 180 initialement étaient présents. Par conséquent, lors de la comparaison des résultats aux pré et post-tests, ce ne sont que ces 85 élèves qui ont été pris en considération.

2.3 Instruments de mesure

2.3.1. Le FCI et la mesure du changement conceptuel

Le test Force Concept Inventory ou test FCI (Hestenes *et al.*, 1992) est un questionnaire ayant pour objectif d'examiner et d'évaluer les préconceptions présentes chez les élèves en mécanique newtonienne. Ce test consiste en un questionnaire à choix multiple (QCM) standardisé de 30 questions de cinq items chacune qui est disponible en de

très nombreuses langues (<http://modeling.asu.edu/RetE/Research.html>). Il a été élaboré à partir de verbalisations de nombreux élèves (plus de 1000) dont les réponses incorrectes les plus populaires ont été transcrites en lettres. Une taxonomie complète des préconceptions peut être trouvée dans l'article original (Hestenes *et al.*, 1992). On y retrouve six dimensions (Savinainen et Scott, 2002) : la cinématique, la première, deuxième et troisième loi de Newton, ainsi que le principe de superposition et les sortes de forces. Il s'agit d'un outil diagnostique largement répandu, pour des niveaux d'éducation variés allant de l'enseignement secondaire à l'enseignement supérieur et est utilisé à la fois comme outil d'enseignement et de recherche. Un exemple emblématique de son utilisation est celui de Hake (1998) comportant plus de 6500 élèves pour lesquels les résultats du FCI ont été comparés en fonction de différentes méthodes d'enseignement. Une autre caractéristique de ce test est qu'il ne nécessite aucun calcul ni graphique, dans le but de relever les conceptions des élèves. La Figure 1 est un exemple d'une de ces questions.

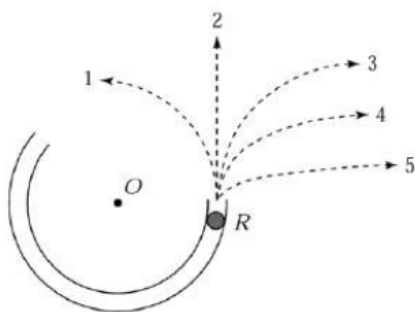


Figure 1. Exemple de question du FCI (Hestenes *et al.*, 1992).

Dans cet exemple, on illustre un tube posé sur une table horizontale ayant la forme d'un arc de centre O. La situation est une vue du dessus de la table. Les forces exercées par l'air et le tube sont négligeables. Une bille est envoyée à grande vitesse dans le tube et en sort au point R. On demande laquelle des 5 trajectoires sera suivie par la bille après sa sortie en R. La réponse attendue est la trajectoire en ligne droite correspondant à la trajectoire n° 2. En effet, en l'absence de force s'exerçant sur la balle (dans le plan considéré), cette dernière suit un mouvement rectiligne uniforme (MRU). Le vecteur vitesse au point P étant tangentiel à la trajectoire circulaire, la seule réponse correcte est donc la trajectoire n° 2. Les réponses 3, 4 et 5 sont toutes les trois associées à la préconception selon laquelle la balle subit une force centrifuge la poussant vers l'extérieur. La réponse n° 1 est quant à elle associée à un raisonnement selon lequel la balle conserve d'une certaine manière une « mémoire » de sa trajectoire circulaire antérieure.

Pour cette étude, une version en langue française du test FCI a été administrée sous une forme papier/crayon avec une grille à compléter. L'ensemble de la cohorte a passé ce test en

même temps dans un local adapté. Les résultats ont ensuite été encodés dans un tableur par les chercheurs.

À partir des réponses fournies par les élèves, il est donc possible d'identifier si un dispositif d'entraînement a permis une meilleure compréhension des concepts de la mécanique newtonienne. Plus encore, les réponses incorrectes fournies permettent de sonder quelles sont les préconceptions partagées par les élèves et comment ces dernières évoluent suite à un certain type d'enseignement.

Afin de quantifier l'évolution des résultats entre deux passations du FCI, le gain a été défini comme la différence entre les résultats au post-test et ceux au prétest pour un même élève. Ce paramètre mesure également le changement conceptuel pendant la période considérée dans l'expérience. Il peut être exprimé en pourcentage et il est possible d'en calculer une moyenne et un écart-type sur l'ensemble de la cohorte. L'inconvénient est de comparer le gain d'un ensemble d'élèves à un autre ayant des résultats au prétest fort différents puisque ces résultats au prétest sont un indicateur des compétences initiales des élèves. Dès lors, c'est le gain normalisé (Hake, 1998) qui a été utilisé comme indicateur de l'efficacité d'une séquence de cours (Martín-Blas *et al.*, 2010). Il est défini comme suit :

$$\langle g \rangle = \frac{\langle S_{post} \rangle - \langle S_{pré} \rangle}{100\% - \langle S_{pré} \rangle}$$

Les crochets font ici référence à la moyenne sur la cohorte considérée. Ainsi, $\langle S_{post} \rangle$ et $\langle S_{pré} \rangle$ correspondent respectivement aux moyennes obtenues pour les résultats au post-test et au prétest. Également indicateur du changement conceptuel, ce nombre peut s'interpréter comme le gain effectif des élèves divisé par le gain potentiel maximum. En fonction des résultats, le gain normalisé peut être classé selon trois niveaux (faible, moyen ou élevé).

Hake (1998) montre que le gain normalisé est indépendant du score au prétest, ce qui permet ainsi la comparaison entre des résultats obtenus dans différentes études. Une méta-analyse (Von Korff *et al.*, 2016) confirme ces éléments et montre aussi que la plupart des études utilisent en pratique une définition légèrement différente du gain normalisé moyen, en calculant le gain normalisé par élève noté g_i et en réalisant ensuite la moyenne sur l'ensemble des élèves. Toutefois, plusieurs auteurs (Bao, 2006 ; Hake, 1998) indiquent que la différence entre ces deux définitions n'est pas significative pour de grands groupes. L'avantage de cette dernière est qu'elle permet d'avoir accès à la déviation standard et donc de quantifier l'étalement de ce gain normalisé autour de la moyenne. Par conséquent, dans la suite de notre étude, c'est à la notion de gain normalisé que nous ferons référence.

2.3.2. Le WCST et la mesure des fonctions exécutives

Parallèlement aux modules de physique, nous avons présenté à près de la moitié de la cohorte le Wisconsin Card Sorting Test (WCST) développé par les psychologues Grant et Berg (1948).

Ce test est très populaire (Clément, 2021; Jones, 2021), notamment auprès des neuropsychologues, et a été cité dans plus de 600 articles de recherche (Greve *et al.*, 2005). Bien qu'initialement développé pour mesurer les capacités de raisonnements abstraits et que ce test soit actuellement une des tâches classiquement utilisées pour évaluer la flexibilité mentale (Monchi *et al.*, 2001), une méta-analyse sur les résultats de neuroimagerie portant sur le WCST conforte aussi la capacité de ce test à mesurer l'ensemble des fonctions exécutives (Buchsbbaum *et al.*, 2005). Comme le soulignait Miyake en 2000 (Miyake *et al.*, 2000 cité par Clément, 2021), le WCST correspond à une épreuve de fonctions exécutives de haut niveau, impliquant la flexibilité mentale, mais aussi l'inhibition. D'autres chercheurs (Steinmetz et Houssemand, 2011) comparant ce test avec d'autres tests neurocognitifs mesurant l'inhibition (p.ex. tâche de go-no go) montrent que ce test permet bien d'évaluer le contrôle inhibiteur. Le caractère direct de ce test – évaluation des fonctions exécutives par une mise en situation concrète –, ludique et informatisable sur tablette, représentative – n'implique pas la subjectivité d'un tiers – et identifié comme un test adapté aux adultes, ont été autant d'arguments justifiant le choix de celui-ci parmi la multitude des tests possibles (Clément, 2021). Dans ce test, plus le nombre d'erreurs est important, moins on considère que les capacités d'inhibition sont importantes et donc le contrôle inhibiteur faible (Kwon et Lawson, 2000).

En pratique, ce test consiste à associer des cartes par paire selon différents critères : la couleur (p.ex. jaune), le nombre (p. ex. deux) ou la forme (p.ex. triangle) des symboles y figurant. Le WCST possède 4 cartes stimuli comportant respectivement : un triangle rouge, deux losanges verts, trois croix jaunes et quatre ronds bleus. En plus de ces quatre cartes stimuli, le WCST comporte dans sa version originale 128 cartes réponses sur lesquelles figure un dessin pouvant varier suivant trois critères : la couleur, le nombre ou la forme. Suite à un appariement, l'individu reçoit alors un feedback de l'examineur de type « correct » ou « incorrect ». Aucune autre information n'est donnée aux personnes lors de la passation de cette épreuve. Ils doivent dès lors trouver la règle d'appariement par une stratégie d'essais et erreurs. Si le sujet se trompe, il est invité à faire une autre proposition, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ait trouvé la règle attendue. Chaque assortiment incorrect est compté comme une erreur.

Après un certain nombre d'appariements corrects, la règle change sans que le sujet en soit averti. Ce dernier doit alors, au moyen du feedback, comprendre que la règle

d'assortiment qu'il utilisait et qui jusqu'ici était correcte ne l'est plus. À partir de là, le participant doit trouver la nouvelle règle et réaliser un certain nombre d'assortiments en utilisant cette nouvelle règle jusqu'à ce que cette dernière change à nouveau. Le changement de règle se produit au bout de cinq appariements corrects et si un élève se trompe avant d'avoir atteint les cinq appariements corrects, le compteur revient à zéro. Il faut donc que l'élève réalise cinq appariements corrects successifs afin de s'assurer que la stratégie de résolution utilisée n'est pas aléatoire, mais plutôt stable. Le test s'arrête lorsque la totalité des cartes réponses a été assortie.

Lors de ce test, un individu doit donc être capable de mettre en place une stratégie de résolution, de maintenir cette dernière pendant un certain laps de temps avant de recevoir un feedback négatif. L'individu doit alors le plus rapidement possible adapter sa stratégie de résolution et maintenir cette dernière tout en se retenant de ne pas utiliser la stratégie précédemment correcte. Ce test fait donc appel à la flexibilité mentale lors de l'adaptation à différentes règles, à la capacité d'inhiber une stratégie de résolution précédemment correcte, ainsi qu'à la mémoire de travail et à l'attention.

En plus du temps de réaction moyen, différentes informations peuvent être obtenues à partir de ce test. Tout d'abord, plus un individu réalise de changements de règles au cours du test, plus sa capacité à s'adapter à une nouvelle règle et à maintenir cette dernière sera importante. On définit le nombre de changements de règles comme étant le nombre de fois qu'un individu parvient à réaliser cinq assortiments corrects consécutifs au cours du test. Cette variable est en lien avec la flexibilité mentale.

Le nombre d'assortiments incorrects réalisé par un individu au cours du test n'est pas facilement interprétable : certaines erreurs peuvent être dues à de l'inattention ou du hasard tandis que d'autres sont prévisibles. De fait, lorsqu'un changement de règles se produit, l'individu n'a a priori aucun moyen de le savoir. Il va alors nécessairement commettre à minima une erreur qui ne renseigne pas sur ses capacités cognitives. C'est pourquoi il est plus intéressant de relever les erreurs dites de persévération. De fait, la persévération indique la tendance à persister dans certains comportements ou pensées, et ce indépendamment des conséquences sociales ou du retour donné à l'individu. La persévération est ainsi un déficit dans les fonctions exécutives et indique une incapacité à passer d'une stratégie cognitive à une autre (Danial, 2013). Elle correspond à la répétition d'une réponse précédente à un nouveau stimulus et au manque d'inhibition de cette dernière. Lors du test du WCST, on dit dès lors qu'un individu commet une erreur de persévération lorsqu'il se base sur la règle précédant celle en cours pour répondre à une nouvelle règle d'appariement. Un grand nombre d'erreurs de persévération est donc un indicateur de l'inefficacité du contrôle inhibiteur (Arbuckle et Gold, 1993; Buchsbbaum *et al.*, 2005; Dillon et Pizzagalli, 2007).

Dans cette étude, la version originale du test – de 128 cartes – pouvant durer jusqu'à 30 min, nous avons fait le choix d'utiliser une version plus courte – de 64 cartes – tout en maintenant à l'identique la procédure de passation. Plusieurs auteurs (Axelrod, 2002 ; Greve, 2001 ; Smith-Seemiller *et al.*, 2001) affirment que les résultats obtenus avec cette version courte sont similaires à ceux de la version originale. Ce test a été administré via l'utilisation de tablettes numériques mises à disposition par notre Laboratoire et au moyen d'une application informatique (Psych Lab 101 édité par Neurobehavioral Systems®) et permettant l'enregistrement des résultats. La passation est conforme à l'implémentation du test originel de Grant et Berg (1948), si ce n'est que le feedback – l'indication « correct » ou « incorrect » – à destination des participants était donné directement par l'application informatique et non par un examinateur. Lors de chacune des 4 passations, systématiquement réalisées en début d'un module de cours, les élèves avaient approximativement une dizaine de minutes pour réaliser cette tâche dans un local spécialement aménagé.

2.4 Considérations éthiques

Dans le cadre de ce projet, les participants ont été informés que leurs résultats aux tests seraient utilisés de manière anonyme lors des analyses. Ils ont été informés de la destruction des données enregistrées et écrites à la fin de l'étude. Aucun participant n'a reçu de pression des chercheurs ou des enseignants du cours propédeutique pour participer à cette recherche. Chaque participant pouvait avoir accès à ses données et ne pouvait lire celles des autres participants. Les considérations éthiques respectaient scrupuleusement le Code d'éthique de la recherche en Belgique. Conformément au règlement RGPD, chaque participant était en droit de demander quelles étaient les données conservées sur lui-même ou de s'opposer à leur conservation.

3. Résultats

3.1 Résultats au prétest

Le Tableau 2 présente les statistiques descriptives principales des résultats au prétest FCI des participants à l'ensemble de l'étude.

Tableau 2. Résultats au prétest FCI pour les participants à l'ensemble de l'étude.

	n	M (/30)	ET (/30)
Population	85	9.16	4.09
Filles	48	8.00	3.76
Garçons	37	10.68	4.04

Une différence de score au prétest apparaît en fonction du genre des participants. Cette différence très significative (Student $t = -3,12$; $p = 0,0026$) et est en faveur des garçons ($M = 8,00$ pour les filles, contre $M = 10,68$ pour les garçons).

3.2 Variabilité du gain normalisé et genre

En s'intéressant au gain normalisé des participants ($n=85$) ayant passé le post-test (voir Figure 2), on constate d'emblée qu'au bout de la semaine de cours, l'amélioration de la compréhension des concepts de mécanique newtonienne mesurée par le gain entre le post-test et le prétest semble avoir été peu importante pour de nombreux étudiants, le gain moyen n'étant que de 3,98 points sur 30 items évalués, soit un gain moyen d'environ 14 %. Bien que cette évolution puisse sembler faible, elle est néanmoins comparable à celle que l'on retrouve dans la littérature pour des étudiants entamant leur programme d'étude universitaire, y compris après des sessions de cours établies sur plusieurs semaines (Demirci, 2005 ; Gok, 2012 ; Martín-Blas *et al.*, 2010 ; Mears, 2019 ; Savinainen et Scott, 2002 ; Thibault et Potvin, 2018).

En observant le test FCI dans sa globalité pour chacune des questions, la proportion d'étudiants qui y ont répondu correctement étant différente, un test non paramétrique a été réalisé. Il montre qu'il existe une différence significative (Fisher-Pitman $Z = -2,33$; $p = 0,020$) entre les moyennes des scores par question au prétest ($M = 31\%$, $ET = 19\%$) et au post-test ($M = 45\%$, $ET = 22\%$).

En outre, la variabilité des résultats est assez importante. Pour la question n° 2 par exemple, les résultats au prétest (bleu) et au post-test (rouge) sont inférieurs à 20 %. Il en est de même pour les questions 5, 13 et 26. À l'inverse, les questions 3, 6, 7, 12, 19 et 24 présentent des scores de 50 % et plus au pré et post-test.

On peut aussi s'intéresser au gain normalisé pour chacune des questions (Figure 3). Celui-ci s'avère fort hétérogène en fonction des questions et vaut en moyenne 21 % avec un écart-type de 21 %. En suivant la classification de Hake (1998), le gain normalisé pour cette étude peut être qualifié de faible (Low, L).

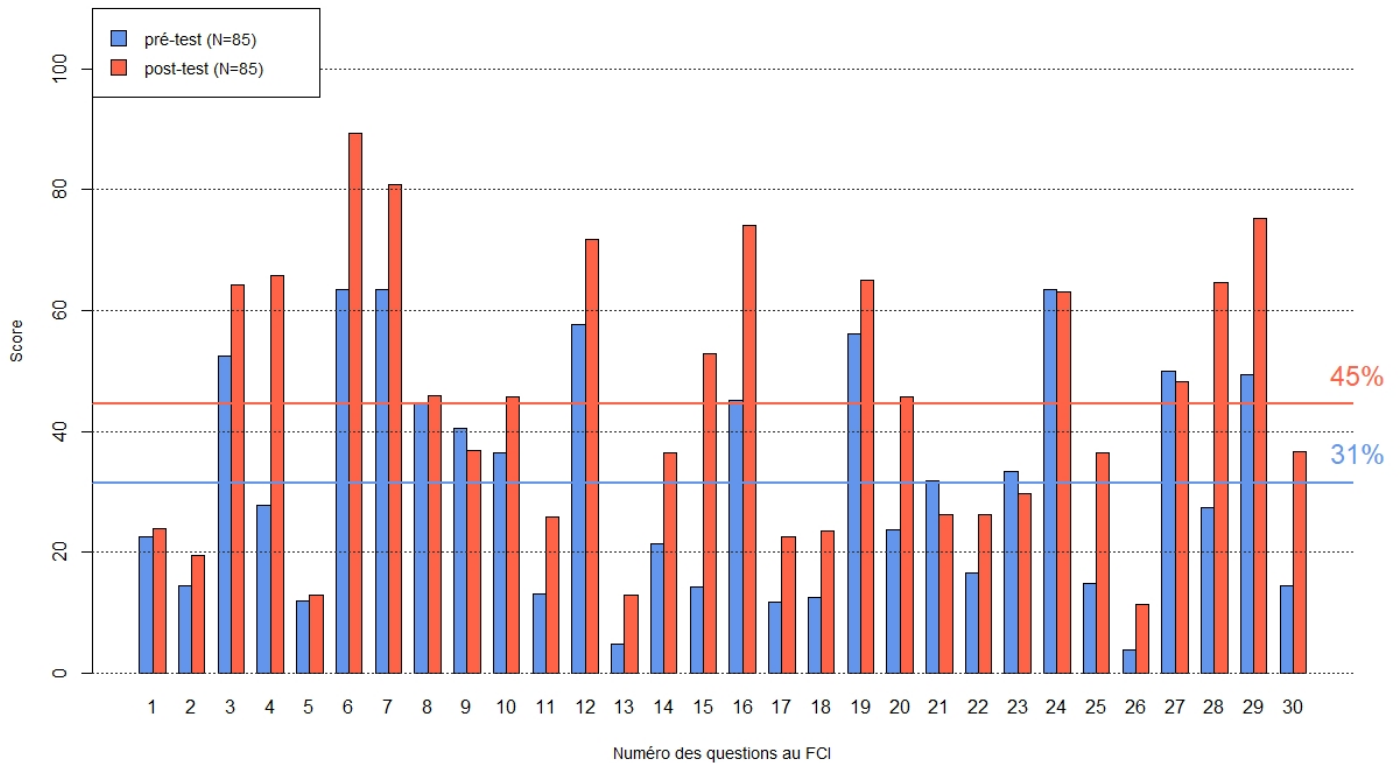


Figure 2. Score (en %) pour les 30 questions du test FCI pour le prétest (rouge) et le post-test (bleu). La moyenne des résultats est de 45 % au post-test contre 31 % au prétest.

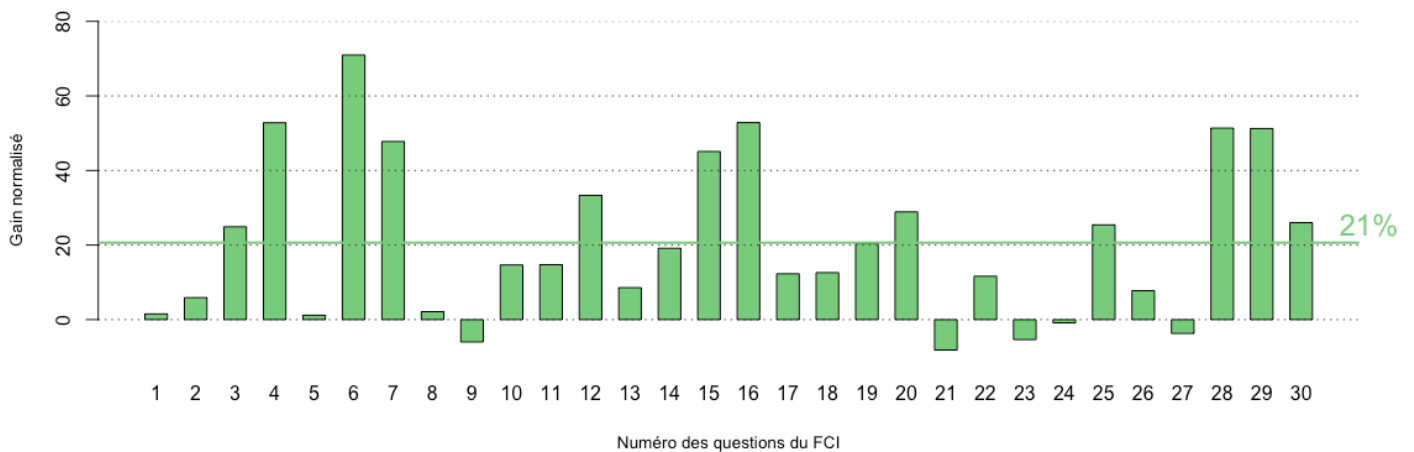


Figure 3. Gain normalisé (en %) pour chacune des questions du FCI pour l'ensemble des élèves (n = 85). Pour certaines questions (p. ex. n° 4 ou n° 16), le gain normalisé est proche de 50 % tandis qu'il est négatif pour d'autres questions (p. ex. n° 9 ou n° 21).

En outre, pour chacune des questions du prétest et du post-test, la performance des filles (n = 48) est comparée à celle des garçons (n = 37). Il est possible de constater que les garçons ont mieux performé, voir Figure 4, particulièrement

au prétest et notamment à la question 19. Pour cette question, il est fait mention de carrés numérotés représentant la position de deux blocs à des intervalles de 0,20 s. Le biais de genre ne semble donc pas y apparaître.

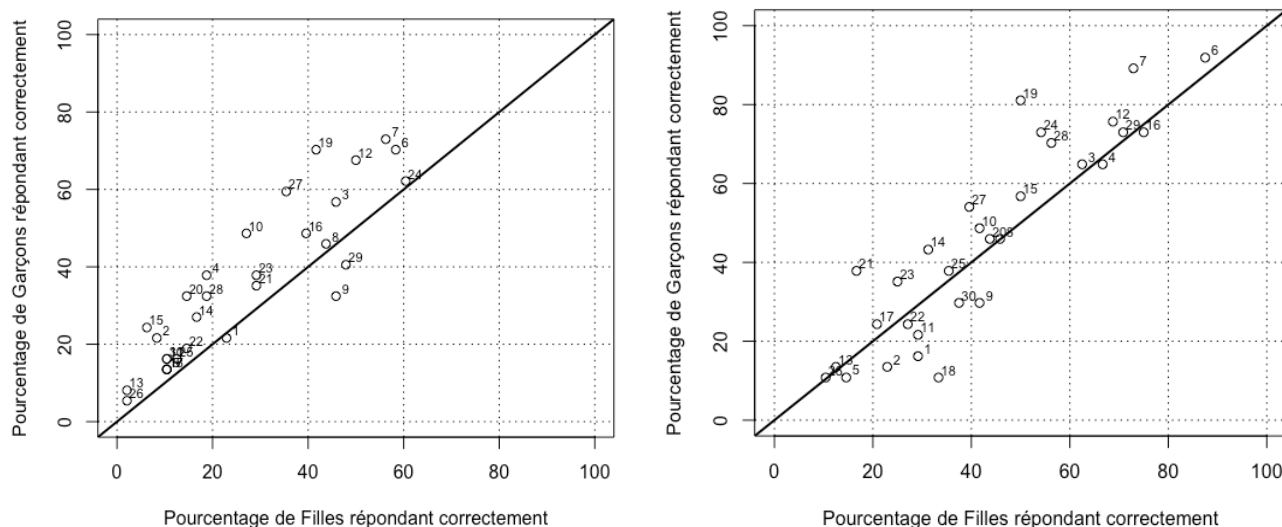


Figure 4. Comparaison des performances des filles et des garçons au FCI au prétest (à gauche) et au post-test (à droite). Chaque point correspond à l'une des 30 questions.

Le Tableau 3 montre l'ensemble des résultats obtenus pour les participants ayant réalisé les deux passations du test FCI (prétest et post-test). Il apparaît que la distribution du gain normalisé pour les filles est plus élevée que celle des garçons. Au vu des résultats prétest/post-test, l'origine de cette différence réside dans le fait que les résultats au prétest sont plus faibles pour les filles que pour les garçons. Les filles ont

donc en moyenne réalisé une moins bonne performance au prétest ($M = 26,2 \%$, $ET = 11,5 \%$) que les garçons ($M = 37,1 \%$, $ET = 14,8 \%$) mais ont plus progressé. Cette différence de performance est significative au prétest ($Z = -3$; $p = 0,003$), mais s'estompe au post-test.

Tableau 3. Résultats aux tests FCI pour les participants ayant réalisé les deux passations du test FCI.

Variables	Population (n = 85)		Filles (n = 48)		Garçons (n = 37)		
	M	ET	M	ET	M	ET	
Prétest FCI	%	31.3	14.2	26.2	11.5	37.1	14.8
Post-test FCI	%	44.3	14.8	43.3	14.3	45.5	15.5
Gain normalisé	%	18.8	17.2	22.3	14.5	14.2	19.4

Une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs a été menée pour examiner les effets du genre (Filles/Garçons) et de la participation à l'entraînement WCST (GC = Groupe Contrôle/GT = Groupe Test) sur le gain normalisé. L'analyse des résidus a été effectuée pour vérifier les hypothèses de l'ANOVA à deux facteurs. La normalité a été déterminée à l'aide du test de normalité de Shapiro-Wilk et l'homogénéité des variances a été déterminée par le test de Levene.

Il y a 5 valeurs considérées comme aberrantes qui ont été retirées de l'analyse, voir Figure 5. Ceci prit en compte, les résidus sont normalement distribués ($p > 0,05$) et les variances sont homogènes ($p > 0,05$).

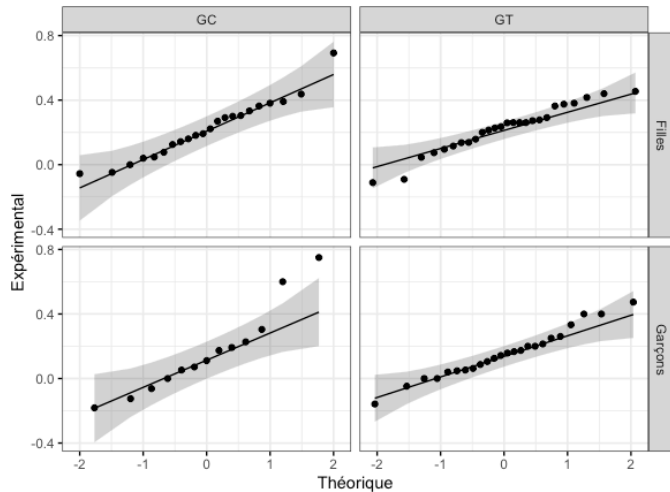


Figure 5. À l'exception de 5 valeurs aberrantes, les points se situant le long de la ligne de référence pour chaque cellule, la normalité des gains normalisés peut donc être supposée.

L'analyse ne montre pas d'interaction statistiquement significative entre le genre (Filles/Garçons) et la participation à l'entraînement WCST (GC/GT) sur le gain normalisé ($F(1; 76) = 0,265, p = 0,608$).

Par conséquent, une analyse en régression linéaire a été effectuée sur chacun de ces deux facteurs séparément. Elle montre qu'il y a une différence statistiquement significative concernant le gain normalisé en fonction du genre ($t = 3,355, p = 0,0012$), la différence de gain normalisé en fonction de la participation à l'entraînement WCST n'est pas statistiquement très significative ($t = 1,973, p = 0,052$)

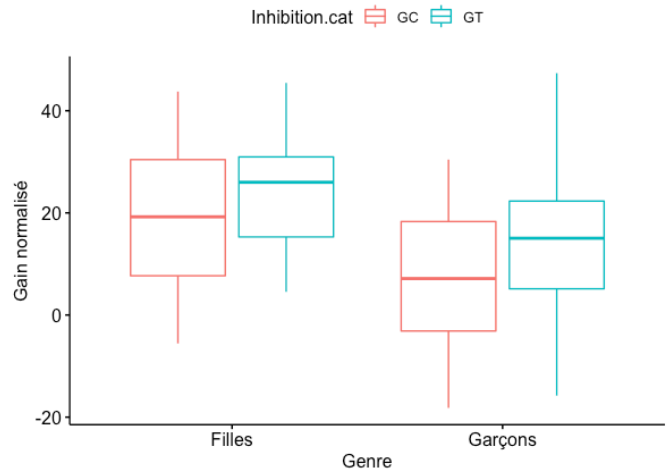


Figure 6. Distribution du gain normalisé (en %) en fonction du genre (Filles/Garçons) et de la participation à l'entraînement (GC = Groupe Contrôle/GT = Groupe Test).

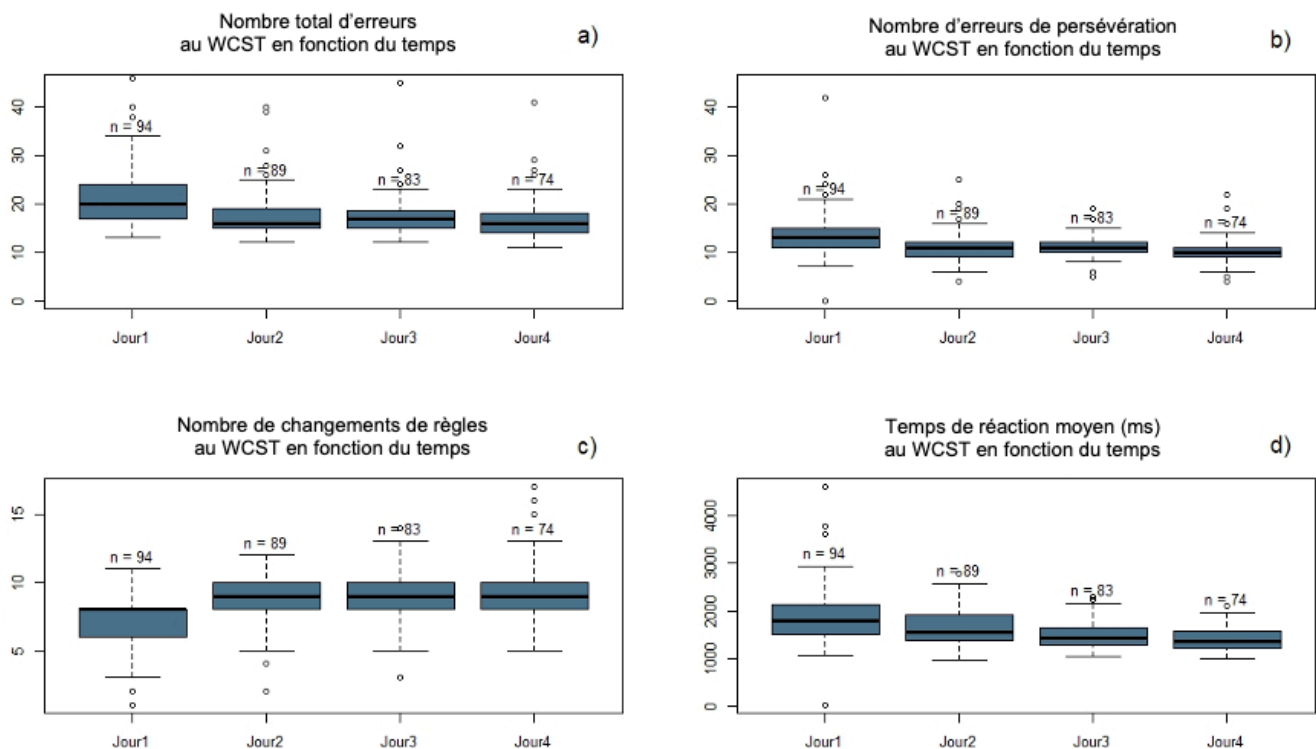


Figure 7. Distribution des variables associées au WCST en fonction des jours. Le nombre d'élèves ayant passé le test est indiqué au-dessus de chaque distribution. Les Figures a), b), c) et d) correspondent respectivement au nombre total d'erreurs, au nombre d'erreurs de persévération, au nombre de changements de règles et au temps de réaction moyen.

3.3 Résultats WCST, lien entre le gain normalisé et les fonctions exécutives

Lors de la passation du WCST, quatre variables ont été enregistrées lors de chaque test. Il s'agit du nombre d'erreurs, du nombre d'erreurs de persévération, du nombre de changements de règles et le temps de réaction moyen. L'évolution de la distribution de ces variables au cours de la semaine pour l'ensemble des élèves du groupe test est illustrée sur les quatre graphiques de la Figure 7.

À la lecture de la Figure 7, on constate une évolution positive relativement faible au cours de la semaine pour les quatre variables considérées. Parmi les variables relevées au WCST, le nombre d'erreurs de persévération est le plus approprié pour mesurer le contrôle inhibiteur (Kwon et Lawson, 2000). Plus ce nombre est proche de 0, plus la capacité d'un individu à inhiber est considérée comme élevée.

Pour s'assurer que les variations de performance à cette tâche ne sont pas dues à des comportements inattendus des participants, certains résultats aberrants ont été supprimés. Plus précisément, les résultats des individus dont la différence entre leur résultat et la moyenne au score au WCST pour l'ensemble des participants est supérieure à deux écarts-types ont été retirés des analyses. Cela a eu pour conséquence de retirer 3 participants de l'échantillon pour un total de 47 participants. Une analyse de corrélation linéaire a été effectuée. Cette dernière montre qu'il existe une corrélation positive, que l'on peut considérer comme forte (Cohen, 1988), entre le gain normalisé au FCI et le nombre d'erreurs de persévération compté négativement (voir Figure 8).

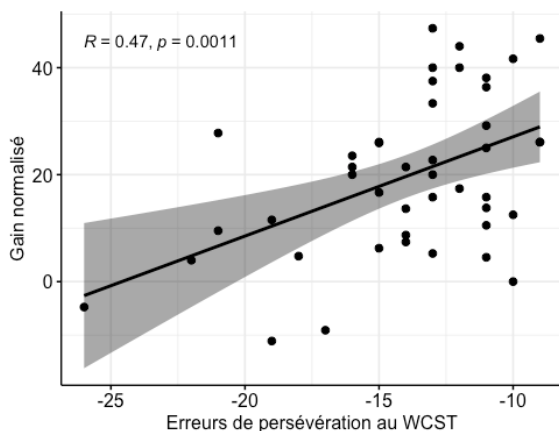


Figure 8. Gain normalisé au FCI en fonction du nombre d'erreurs de persévération au WCST (compté négativement) représentant la capacité à inhiber. Une régression linéaire a été effectuée et le coefficient de corrélation R est indiqué. La zone grisée correspond à l'intervalle de confiance de la régression.

Le coefficient de Pearson obtenu dans cette recherche est légèrement plus élevé que celui obtenu dans l'étude de

Thibault et Potvin (2018) où le gain au FCI avait été utilisé (voir Tableau 4). Il s'agit ici d'un résultat intéressant, mais il convient d'être prudent. De fait, au vu de la dispersion des résultats, il se peut que la présence de valeurs extrêmes biaise ce résultat. En effet, un test statistique comme celui de Pearson est impacté par la présence de ce type de valeurs. Pour éviter ce biais et obtenir un résultat plus robuste, il est possible de faire appel à des tests dits non paramétriques, libérés de l'hypothèse de normalité, tels que ceux de Spearman et de Kendall. Bien qu'ils concordent, ces résultats s'interprètent différemment, le rho ρ de Spearman est perçu comme le coefficient de corrélation de Pearson, puisqu'il est calculé à partir des rangs, tandis que le tau τ de Kendall désigne plutôt la différence entre la proportion d'observations dans le même ordre ou dans un ordre différent. Nos résultats corroborent également ceux de Thibault et Potvin (2018), à savoir une corrélation positive statistiquement significative ($\rho = 0,445$, $\tau = 0,338$, $p < 0,01$) ainsi qu'un effet légèrement plus faible que celui montré par le coefficient de Pearson. De plus, l'intérêt d'utiliser le gain normalisé est de comparer cette évolution du score des groupes d'élèves présentant des connaissances initiales différentes. On peut voir que la valeur du coefficient de corrélation pour le gain normalisé est similaire à celle du gain, bien que légèrement moins élevée. Ces résultats sont présentés au Tableau 4.

Tableau 4. Comparaison de la corrélation de la capacité d'inhibition avec le gain normalisé au FCI, le gain au FCI et les résultats de Thibault et Potvin (2018).

	Gain normalisé	Gain	Gain issu de Thibault et Potvin (2018)
Coefficient de Pearson (R)	0,474	0,496	0,427
p-valeur (R)	0,0011	0,0006	0,0047

4. Discussion

Nous avons fait l'hypothèse qu'un entraînement aux fonctions exécutives même pendant une période de très courte durée montrerait des résultats observables en termes d'évolution du changement conceptuel en mécanique.

Dans l'étude originale de Hake (1998), un gain normalisé de $23\% \pm 4\%$ est obtenu sur une cohorte de 2084 élèves ayant suivi un semestre de cours traditionnels de physique aux États-Unis. Dans une autre étude réalisée par Dermici (2005) sur 125 élèves âgés de 15 à 18 ans se déroulant sur huit semaines de cours, le gain normalisé observé est de 28 %. Enfin, dans l'étude de Thibault et Potvin (2018) sur 59 élèves en première année de génie au Québec, le gain normalisé est de 11 % (calculé à partir des scores moyens au pré et au post-test donnés dans l'article). En ce qui concerne la présente recherche, nous observons que le gain normalisé obtenu au

FCI par les étudiants durant la semaine de cours propédeutique en physique est de $21\% \pm 21\%$, ce qui est en accord avec l'évolution des scores obtenus pour des études sur des périodes beaucoup plus longues (Demirci, 2005 ; Gok, 2012 ; Martín-Blas *et al.*, 2010 ; Mears, 2019 ; Savinainen et Scott, 2002 ; Thibault et Potvin, 2018). On observe donc une progression similaire bien que l'écart-type soit bien plus important dans notre cas. On peut donc dire que l'évolution des résultats des élèves au test FCI durant la semaine de cours propédeutiques se situe dans le même ordre de grandeur que pour la plupart des cours de mécanique. Il semble qu'une semaine de cours intensif de physique puisse permettre de progresser autant qu'un cours d'un semestre complet avec quelques heures de physique. Les résultats obtenus dans cette recherche mettent de l'avant qu'une réelle assimilation des concepts de mécanique est une tâche complexe. Le nombre important d'élèves qui continuent à répondre de la même manière à certaines questions, avant et après le cours propédeutique, montre que leurs préconceptions sont toujours bien présentes et continuent à prévaloir.

En termes de devis de cette recherche, la participation passive des élèves au groupe contrôle est une limite. En effet, on ne peut complètement exclure que le simple fait d'avoir utilisé une tablette lors de l'entraînement pour le groupe test n'ait pu engendrer chez les participants une meilleure performance au FCI. Rappelons toutefois que le test FCI était réalisé sous une forme papier/crayon pour tous les participants à cette étude.

Si la différence de gain normalisé observée en fonction de la participation à l'entraînement WCST n'est pas statistiquement très significative ($t = 1,973$, $p = 0,052$), ceci nous pousse à penser soit que la modalité d'entraînement telle que proposée ne semble pas avoir été suffisamment importante, soit que le transfert de l'entraînement WCST vers la physique n'a pas été suffisamment efficient.

En effet, on ne peut exclure que l'utilisation d'autres tâches, davantage liées au contrôle inhibiteur, permette d'observer de meilleurs résultats. De fait, une récente étude (Delalande *et al.*, 2020) portant sur un entraînement à l'inhibition utilisant une tâche de Stroop et de Stop-Signal sur cinq semaines n'a pas apporté d'évolution significative des fonctions exécutives telles que mesurées par ces tests. Cependant, ces chercheurs ont observé de subtiles modifications structurales au niveau du cerveau qui ont, selon eux, été induites par cet entraînement à l'inhibition. Si l'on en croit cette étude, ce type d'entraînement aurait donc un réel effet sur le cerveau bien que celui-ci soit modéré.

Il est aussi possible d'inférer que des échelles de temps plus importantes sont nécessaires avant d'observer un effet éventuel de ce type d'entraînement sur la manière de raisonner et plus particulièrement sur la manière de raisonner en physique. De fait, l'évolution que nous observons

pour les quatre variables considérées au cours de la semaine d'entraînement semble assez limitée. Il serait donc intéressant lors de futures recherches d'évaluer l'impact d'un entraînement plus long ou de vérifier s'il n'existe pas un délai entre l'entraînement et les effets bénéfiques de ce dernier. En effet, de nombreuses activités et programmes contribuant à améliorer les fonctions exécutives semblent émerger (Diamond et Ling, 2019 ; Smid *et al.*, 2020). De plus, de nombreux chercheurs (Brookman-Byrne *et al.*, 2018 ; Maraver *et al.*, 2016 ; Vosniadou *et al.*, 2016 ; Wilkinson *et al.*, 2020) s'intéressent au transfert des effets de l'entraînement du contrôle inhibiteur en particulier, vers d'autres tâches liées aux sciences et aux mathématiques, chez les adolescents et les jeunes adultes. Les résultats de ces études ne convergent pas tous et l'absence de consensus sur un transfert vers les sciences et mathématiques invite à approfondir cette question, notamment sur la durée.

Notre seconde hypothèse était que l'évolution du changement conceptuel en mécanique mesuré par la force de la mobilisation des conceptions premières serait liée à l'utilisation de ses fonctions exécutives, et en particulier de l'inhibition.

Nos résultats indiquent qu'il y a une corrélation ($R = 0,474$; $p = 0,011$) entre le gain normalisé obtenu au FCI et le nombre d'erreurs de persévération au WCST représentant la capacité à inhiber. Pour rappel, plus le nombre d'erreurs de persévération est faible, plus le gain normalisé au FCI est important. Dit autrement, l'évolution positive du score en mécanique newtonienne chez les élèves est d'autant plus importante que ces derniers sont capables d'inhiber une règle d'assortiment au WCST. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Thibault et Potvin (2018). On peut donc supposer qu'il existe une relation forte entre le gain normalisé au FCI et l'inhibition telle que mesurée par les erreurs de persévération du WCST. Concrètement, les élèves possédant un score plus élevé au WCST (peu d'erreurs de persévération) ont tendance à plus progresser sur le plan du changement conceptuel au cours de la semaine de cours propédeutique. Dans le cadre de la recherche de Thibault et Potvin (2018), cette évolution avait lieu au cours d'un semestre de cours. Cette recherche nous permet d'obtenir les conclusions similaires, mais sur une période de temps beaucoup plus courte, ce qui est encourageant. Les résultats au test WCST semblent donc être aussi un indicateur de l'évolution des capacités des élèves à performer en mécanique sur une échelle de temps aussi courte qu'une semaine. Ceci renforce le caractère diagnostique du test WCST sur le changement conceptuel.

Ceci peut être interprété comme la possibilité que les fonctions exécutives, et en particulier l'inhibition, sont capables de prédire l'évolution du score des élèves en mécanique newtonienne. Faire réaliser le test WCST à des élèves permettrait donc, dans une certaine mesure, de prédire l'évolution de leur changement conceptuel. En aucun

cas, ces résultats ne doivent être interprétés de manière à favoriser des élèves montrant de bonnes fonctions exécutives ou que les cours de sciences et mathématiques devraient leur être réservés parce qu'ils auraient plus de chance de les réussir. Toutefois, une corrélation, même forte, n'est pas un lien de cause à effet. L'intérêt du test WCST utilisé réside donc dans sa dimension diagnostique de la possibilité d'un changement conceptuel chez les élèves. Avec ce type d'information en main, un enseignant de physique pourrait par exemple être en mesure d'identifier les élèves les plus susceptibles de faire face à des difficultés au cours de l'année scolaire.

Enfin, nous formulons l'hypothèse que par la mesure de la mobilisation des conceptions premières en mécanique, il serait possible d'observer une différence de performance en fonction du genre fille/garçon.

Nos résultats montrent qu'une différence de score au prétest (Student $t = -3,12$; $p = 0,0026$) apparaît en fonction du genre des participants en faveur des garçons. L'analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs menée pour examiner les effets du genre (Filles/Garçons) et de la participation à l'entraînement WCST sur le gain normalisé ne montre pas d'interaction statistiquement significative entre le genre et la participation à l'entraînement WCST sur le gain normalisé ($F(1; 76) = 0,265$, $p = 0,608$). Nous observons cependant une différence statistiquement significative concernant le gain normalisé en fonction du genre ($t = 3,355$, $p = 0,0012$).

Pour ce qui est de la différence de performance au prétest au niveau du genre, cela semble cohérent avec d'autres recherches (McCullough, 2004; Dietz *et al.*, 2012; Hake, 2002; Kost *et al.*, 2009; Lorenzo *et al.*, 2006; Mears, 2019). Dans ces études, les filles réalisent de moins bonnes performances au FCI que celles des garçons, et ce, à la fois au prétest et au post-test. Le gain normalisé pour les filles est dans la plupart des cas inférieur à celui des garçons. Toutefois, ce n'est pas le cas dans notre recherche. Cet écart de performance entre les filles et les garçons semble être récurrent en physique et pas uniquement au FCI (Ivie et Stowe, 2000; Kahle, 1994). Si une différence de performance est observée au FCI, il se pourrait que celui-ci soit affecté par un biais de genre. Cela pourrait se retrouver dans des questions traitant du déplacement d'objets typiquement considérés comme masculins (Dietz *et al.*, 2012) comme les balles de hockey, les boulets de canon, voire l'utilisation de personnages masculins. Toutefois, la question 19 du test où nos résultats montrent une différence en fonction du genre assez emblématique ne semble pas entrer dans cette catégorie dès lors qu'on n'y parle que de « blocs » et de « vitesse ». Par ailleurs, McCullough (2004) a préconisé l'utilisation d'un FCI révisé dans lequel ces objets à connotation masculine sont remplacés par des objets à connotation plus féminine. Malgré cette modification, ceci n'a pas mené à des changements significatifs dans le score

moyen obtenu par les filles à ce test. Dietz *et al.* (2012) ont aussi tenté de relever des biais de nature plus subtile. Leurs analyses pointent quelques questions qui sembleraient favoriser un genre plutôt que l'autre (6, 12, 23 pour les garçons; 4 et 9 pour les filles). Nos résultats ne nous permettent pas de vérifier ces hypothèses. Traxler *et al.* (2018) propose de n'utiliser qu'une partie des 30 questions du FCI. De manière un peu plus générale, certains auteurs (McCullough, 2004) s'interrogent aussi sur les contextes choisis (en 1992) qui ne correspondraient plus forcément à des contextes familiers aujourd'hui, tant aux filles qu'aux garçons. Or, on sait que le contexte peut affecter la manière dont un élève interprète, analyse et répond à une question, et combien celui-ci appelle certaines préconceptions particulières, tel que le souligne Potvin (2019).

Dès lors, il semble que l'écart des performances au prétest entre les filles et les garçons soit un résultat en accord avec la littérature. Néanmoins, dans le cas de cette étude, le gain normalisé est plus élevé pour les filles que pour les garçons. Ce résultat semble différent de ce qui est observé dans la littérature, qui fait plutôt état d'un gain normalisé plus important chez les garçons. Il ressort cependant d'une étude (Lorenzo *et al.*, 2006) que des méthodes d'enseignement interactives permettraient de réduire voire de supprimer cet écart de performances. Il est dès lors possible que le format intensif de la semaine propédeutique ait plus bénéficié aux filles qu'aux garçons. Il se peut aussi que la manière d'enseigner ait permis aux filles de mieux progresser. Bien qu'intéressantes, la présente recherche n'est cependant pas capable de vérifier ces hypothèses.

S'il existe une différence dans l'évolution des performances en mécanique des élèves en fonction du genre, cela pourrait signifier que le changement conceptuel a été plus efficient chez les filles au cours de cette semaine de cours propédeutique. Enfin, les résultats au WCST pourraient également apporter des informations pertinentes quant aux capacités cognitives comparées des filles et des garçons et s'avérer complémentaires à une étude (Vanhoolandt *et al.*, soumis) sur d'autres étudiants en première année à l'université. En s'intéressant aux stades de développement cognitif et au niveau d'abstraction des étudiants, celle-ci montre des différences cognitives en fonction du genre. D'autres fonctions exécutives pourraient être convoquées pour interpréter cette observation. Ainsi, si la flexibilité mentale des filles était plus importante que celle des garçons, cette flexibilité mentale pourrait permettre aux filles de plus vite s'adapter que les garçons aux nouvelles règles lors du test WCST. Il serait donc possible d'établir un lien entre le changement conceptuel plus marqué chez les filles, et cette flexibilité mentale plus importante.

Ces résultats ont été obtenus dans le cadre d'une semaine de cours propédeutique en sciences physiques. Selon Greefrath *et al.*, (2016), un cours préparatoire est bénéfique pour les

performances des étudiants entrant à l'université dans les domaines scientifiques. De plus, il permet d'identifier des groupes «à risque» dès avant l'entame de l'année académique et ainsi donne la perspective aux enseignants de fournir aux étudiants plus faibles des outils ou des conseils permettant de réduire les inégalités interindividuelles souvent observées dans l'enseignement universitaire.

Néanmoins, de par le fait du caractère optionnel de ce dispositif, la mortalité expérimentale que l'on peut y observer doit être considérée comme une limite à notre recherche. En effet, elle ne permet pas de garantir complètement la représentativité de l'échantillon analysé. Sachant que le temps est un facteur impliqué dans le changement conceptuel en sciences physiques (Potvin *et al.*, 2020), le cadre temporel limité de notre devis expérimental, ne s'étalant que sur une semaine entre notre prétest et notre post-test ne peut garantir que le changement conceptuel ait pu se réaliser chez nos étudiants, notamment dans le cas particulier de la mécanique newtonienne. Enfin, le fait que les étudiants aient déjà pu suivre préalablement à cette recherche un cours sur les concepts de mécanique newtonienne dans l'enseignement secondaire a également pu influencer la prévalence de ces concepts chez certains individus (Potvin, 2013). On ne peut donc exclure que ce facteur contextuel ait une incidence sur leur processus de changement conceptuel.

Toute réflexion faite, le rôle du contrôle inhibiteur pour limiter la mobilisation des préconceptions est relativement bien documenté et le rôle positif de l'inhibition dans les apprentissages scolaires a déjà été démontré dans différents domaines comme l'arithmétique, la lecture et les sciences.

D'une manière complémentaire, des résultats de recherche récents (Allaire-Duquette *et al.*, 2019) montrent que les difficultés que certains élèves éprouvent à mobiliser les connaissances scientifiques pour donner une réponse correcte sont associées à une sous-activation du contrôle inhibiteur. Il semble que, pour ces élèves, le plus difficile soit le contrôle des activités neuronales liées aux préconceptions aux dépens des réseaux de neurones rattachés aux connaissances scientifiques. On retrouve ainsi l'idée d'une cohabitation d'un raisonnement spontané rapide – c'est le système 1 de Kahneman (2012) – pouvant traiter intuitivement l'information avec un raisonnement logicomathématique – le système 2. Comme plusieurs travaux montrent que chez les élèves les erreurs de raisonnement ne relèvent pas nécessairement d'un manque de connaissances ou à une absence de capacités cognitives mais à l'inadéquation d'un raisonnement intuitif (Houdé *et al.*, 2000 ; Houdé et Borst, 2015), il conviendrait donc pour ces élèves de limiter les séances de remédiation où le contenu matière est revu au profit d'un renforcement de l'inhibition. Le renforcement du contrôle inhibiteur pourrait dès lors stimuler le réseau neuronal lié aux connaissances scientifiques, lorsque celles-ci sont présentes.

De fait, dans un apprentissage traditionnel, l'enseignant a tendance à focaliser l'attention de l'élève sur ce qu'il y aurait lieu de faire, par exemple, sur la stratégie à mettre en place pour résoudre un problème. Ce type d'enseignement par algorithme vise l'acquisition d'une stratégie cognitive peu coûteuse d'un point de vue cognitif mais qui ne fonctionne pas systématiquement (Lubin *et al.*, 2012). Pour des situations d'apprentissage où le contrôle inhibiteur est présent, l'enseignant indique alors explicitement la stratégie à suivre et prévient les élèves des pièges et donc de ce qu'il ne faut pas faire. Ce type d'enseignement par heuristique, stimulant le contrôle inhibiteur, vise l'apprentissage d'une stratégie toujours gagnante mais qui se solde par un coût cognitif beaucoup plus important (Lubin *et al.*, 2012). Dans cette stratégie par heuristique, l'enseignant utilise des alertes verbales – par exemple : « Attention, il y a un piège. Il faut faire très attention » – et un matériel didactique expérimental comme – comme un « attrape piège » – sorte de cache indiquant le piège (Houdé *et al.*, 2000). Il s'agit d'apprendre à l'élève à inhiber l'algorithme pour activer l'heuristique. Cette stratégie a été utilisée à plusieurs reprises dans l'enseignement primaire en mathématiques (Deshaies, 2017) et dans l'enseignement secondaire en sciences (Willame et Snauwaert, 2018). Ces études montrent qu'un enseignement du contrôle inhibiteur aurait donc avantage à être développé dans l'enseignement, et ce dès le préscolaire.

En cohérence avec ce qui précède, il conviendrait également, au niveau de la formation initiale des enseignants, de communiquer aux enseignants les produits de la recherche issus de la neurodidactique, comme les mécanismes d'apprentissage et leur mode de fonctionnement ou sensibiliser les enseignants sur l'intérêt du contrôle inhibiteur dans un enseignement par heuristiques.

5. Conclusion

Les techniques d'IRMf qui se sont développées ces dernières années ont permis le développement de la neurodidactique des sciences. Un nombre important d'études investiguent les différences d'activation cérébrales entre des experts et des novices lors de tâches scientifiques impliquant des préconceptions (Potvin, 2013). Chez les experts, les aires cérébrales associées à l'inhibition sont significativement plus activées. D'autres études utilisant les temps de réaction suggèrent aussi qu'un conflit au niveau cérébral existe toujours, même après avoir produit une réponse correcte. Ces recherches mettent en avant le rôle prépondérant du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des sciences.

En outre, l'exercice des fonctions exécutives prédit plusieurs effets positifs, comme les performances académiques, ce qui nourrit un intérêt grandissant pour des interventions ayant pour but de les développer, et ce sur des périodes de temps que l'on souhaiterait réduites. Les transferts potentiels de ces interventions vers d'autres tâches liées à l'apprentissage des

sciences ou aux mathématiques touchent donc des problématiques très actuelles pour lesquelles il n'y a pas encore de consensus, et ce quelle que soient les périodes de temps.

Les résultats obtenus dans cette recherche visent à apporter une contribution de réponse à ces questions. S'ils ne permettent pas d'établir de façon statistiquement très significative d'effet de transfert important d'une modalité d'entraînement à l'inhibition lors d'une période de temps très courte au changement conceptuel en mécanique, il n'est pas exclu qu'un entraînement à l'inhibition sur des périodes de temps plus importantes permette d'observer des transferts vers l'enseignement des mathématiques et des sciences.

Une corrélation forte entre l'inhibition et le changement conceptuel avait déjà pu être établie sur des périodes de temps relativement longues (Thibault et Potvin, 2018). Nos résultats la corroborent et la confirment, même sur une période de temps plus réduite correspondant à un cours intensif. De fait, nous montrons une corrélation forte entre le nombre d'erreurs dites de persévération au test WCST, mesurant la capacité d'un individu à inhiber, et l'évolution de ses capacités en mécanique au cours de la semaine, mesurée par le gain normalisé au test FCI.

Malgré cette évolution globale positive, le changement conceptuel en mécanique chez les élèves reste insuffisant au cours de la semaine. En analysant les distributions de réponses pour chacune des questions, il a été mis en évidence une forte évolution pour certaines d'entre elles, ce qui semble indiquer que certains changements conceptuels ont été réalisés, à tout le moins partiellement. Pour d'autres questions en revanche, on peut observer des réponses incorrectes largement partagées par les élèves qui persistent au post-test. Certaines préconceptions restent fortement ancrées chez les élèves.

L'intérêt du test WCST utilisé dans la recherche réside dans sa dimension diagnostique de la possibilité d'un changement conceptuel chez les élèves. Par conséquent, l'enseignant dispose d'un outil lui permettant d'adapter son enseignement visant l'usage d'heuristiques. Il pourrait dès lors intégrer dans ses cours une attention particulière à l'utilisation efficiente des fonctions exécutives, et particulièrement de l'inhibition, qui pourrait ainsi contribuer avantageusement au changement conceptuel en sciences.

Enfin, nous observons une différence de performance en fonction du genre au niveau de la mobilisation des conceptions premières en mécanique. Nos résultats montrent que les résultats des filles sont moins bons que ceux des garçons au prétest de mécanique newtonienne. Cela est cohérent avec la littérature. Nous montrons en outre que les filles profitent plus avantageusement de la semaine de cours. Si un biais de genre semble être exclu dans l'outil de mesure utilisé, cela pourrait signifier qu'un changement conceptuel

chez les filles ait été plus marqué au cours de cette étude. Peut-être pourrait-il être lié à des différences de flexibilité mentale, voire de capacités cognitives, en fonction du genre ? Ces éléments semblent importants dans l'enseignement des sciences et devraient faire l'objet de recherches ultérieures.

Remerciements

C. V. est titulaire d'une Bourse spéciale de doctorat (BSD) du Fonds de la Recherche Scientifique – FNRS de la Fédération Wallonie-Bruxelles (FWB) de Belgique.

Références

- Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (2021). *Examen d'entrée et d'accès aux études en sciences médicales et dentaires. Statistiques descriptives Éditions 2017 à 2021.* https://www.ares-ac.be/images/publications/2021-12-10_EXMD-Indicateurs-publics.pdf
- Allaire-Duquette, G. (2018). *Relation entre le contrôle inhibiteur et les difficultés des élèves à mobiliser les conceptions scientifiques* [thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal]. Archipel. <https://archipel.uqam.ca/11466/>
- Allaire-Duquette, G., Bélanger, M., Grabner, R. H., Koschutnig, K. et Masson, S. (2019). Individual differences in science competence among students are associated with ventrolateral prefrontal cortex activation. *Journal of Neuroscience Research*, 97(9), 1163-1178. <https://doi.org/10.1002/jnr.24435>
- Allaire-Duquette, G., Brault Foisy, L.-M., Potvin, P., Riopel, M., Larose, M. et Masson, S. (2021). An fMRI study of scientists with a Ph.D. in physics confronted with naive ideas in science. *NPJ Science of Learning*, 6(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00091-x>
- Andersson, I. E. K. et Runeson, S. (2008). Realism of confidence, modes of apprehension, and variable-use in visual discrimination of relative mass. *Ecological Psychology*, 20(1), 1-31. <https://doi.org/10.1080/10407410701766601>
- Arbuckle, T. Y. et Gold, D. P. (1993). Aging, inhibition, and verbosity. *Journal of Gerontology*, 48(5), 225-232. <https://doi.org/10.1093/geronj/48.5.P225>
- Axelrod, B. N. (2002). Are normative data from the 64-card version of the WCST comparable to the full WCST? *The Clinical Neuropsychologist*, 16(1), 7-11. <https://doi.org/10.1076/clin.16.1.7.8331>
- Babai, R. et Amsterdamer, A. (2008). The persistence of solid and liquid naive conceptions: A reaction time study. *Journal of Science Education and Technology*, 17(6), 553-559. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9122-6>

- Babai, R., Sekal, R. et Stavy, R. (2010). Persistence of the intuitive conception of living things in adolescence. *Journal of Science Education and Technology*, 19(1), 20-26. <https://doi.org/10.1007/s10956-009-9174-2>
- Bao, L. (2006). Theoretical comparisons of average normalized gain calculations. *American Journal of Physics*, 74(10), 917-922. <https://doi.org/10.1119/1.2213632>
- Bellack, A. S., Weinhardt, L. S., Gold, J. M. et Gearon, J. S. (2001). Generalization of training effects in schizophrenia. *Schizophrenia Research*, 48(2-3), 255-262. [https://doi.org/10.1016/S0920-9964\(00\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0920-9964(00)00066-9)
- Borst, G., Aïte, A. et Houdé, O. (2015). Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism for typical cognitive development: Evidence from behavioural and brain-imaging studies. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 57, 21-25. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12688>
- Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision-making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective et Behavioral Neuroscience*, 7(4), 356-366. <https://doi.org/10.3758/CABN.7.4.356>
- Brault Foisy, L.-M., Potvin, P., Riopel, M. et Masson, S. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics? *Trends in Neuroscience and Education*, 4(12), 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2015.03.001>
- Brookman-Byrne, A., Mareschal, D., Tolmie, A. K. et Dumontheil, I. (2018). Inhibitory control and counterintuitive science and maths reasoning in adolescence. *PLOS ONE*, 13(6), e0198973. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198973>
- Brown, D. E. et Hammer, D. (2009). Conceptual change in physics. Dans S. Vosniadou (dir.), *International handbook of research on conceptual change* (p. 155-182). Routledge.
- Buchsbaum, B. R., Greer, S., Chang, W.-L. et 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. <https://doi.org/10.1002/hbm.20128>
- Carey, S. (2000). Science education as conceptual change. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(1), 13-19. [https://doi.org/10.1016/S0193-3973\(99\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0193-3973(99)00046-5)
- Clément, E. (2021). *La flexibilité cognitive. Pierre angulaire de l'apprentissage*. ISTE Éditions.
- Cohen, A. L. (2006). Contributions of invariants, heuristics, and exemplars to the visual perception of relative mass. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(3), 574-598. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.3.574>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2^e éd.). L. Erlbaum Associates.
- Cortés Pascual, A., Moyano Muñoz, N. et Quílez Robres, A. (2019). The relationship between executive functions and academic performance in primary education: Review and meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, 10, 1582. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01582>
- Danial, J. T. (2013). Perseveration. Dans F. R. Volkmar (dir.), *Encyclopedia of autism spectrum disorders* (p. 2193-2194). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1698-3_2002
- Delalande, L., Moyon, M., Tissier, C., Dorriere, V., Guillois, B., Mevell, K., Charron, S., Salvia, E., Poiriel, N., Vidal, J., Lion, S., Oppenheim, C., Houdé, O., Cachia, A. et Borst, G. (2020). Complex and subtle structural changes in prefrontal cortex induced by inhibitory control training from childhood to adolescence. *Developmental Science*, 23(4), e12898. <https://doi.org/10.1111/desc.12898>
- Demirci, N. (2005). A study about students' misconceptions in force and motion concepts by incorporating a web-assisted physics program. *Turkish Online Journal of Educational Technology-TOJET*, 4(3), 40-48.
- Dennis, E. L. et Thompson, P. M. (2013). Typical and atypical brain development: A review of neuroimaging studies. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 15(3), 359-384. <https://doi.org/10.31887/DCNS.2013.15.3/edennis>
- Deshaies, I. (2017). *Effets d'une intervention didactique en mathématiques au préscolaire visant le développement du contrôle inhibiteur et adaptée au fonctionnement du cerveau sur l'apprentissage de préalables liés à l'arithmétique* [thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières]. Cognitio. <https://depote.uqtr.ca/id/eprint/8031/>
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A. et Ling, D. S. (2019). Review of the evidence on, and fundamental questions about, efforts to improve executive functions, including working memory. Dans J. M. Novick, M. F. Bunting, M. R. Dougherty et R. W. Engle (dir.), *Cognitive and working memory training: Perspectives from psychology, neuroscience, and human development* (p. 143-157). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199974467.003.0008>

- Dietz, R. D., Pearson, R. H., Semak, M. R., Willis, C. W., Rebello, N. S., Engelhardt, P. V. et Singh, C. (2012). Gender bias in the force concept inventory? *AIP Conference Proceedings*, 1473(1), 171-174. <https://doi.org/10.1063/1.3680022>
- Dillon, D. G. et Pizzagalli, D. A. (2007). Inhibition of action, thought, and emotion: A selective neurobiological review. *Applied and Preventive Psychology*, 12(3), 99-114. <https://doi.org/10.1016/j.appsy.2007.09.004>
- diSessa, A. A. (2014). A history of conceptual change research. Dans R. K. Sawyer (dir.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (2^e éd., p. 88-108). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139519526.007>
- Docktor, J., Heller, K., Henderson, C., Sabella, M. et Hsu, L. (2008). Gender differences in both force concept inventory and introductory physics performance. *AIP Conference Proceedings*, 1064(1), 15-18. <https://doi.org/10.1063/1.3021243>
- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P. et Wood-Robinson, V. (2015). *Making sense of secondary science: Research into children's ideas* (Classic edition). Routledge.
- Duit, R. (2009). *Bibliography STCSE: Students' and teachers' conceptions and science education*. University of Kiel.
- Erikson, G. et Erikson, L. (1984). Females and science achievement: Evidence, explanations, and implications. *Science Education*, 68(2), 6389.
- Giedd, J. N. (2008). The teen brain: Insights from Neuroimaging. *Journal of Adolescent Health*, 42(4), 335-343. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2008.01.007>
- Gok, T. (2012). The effects of peer instruction on students' conceptual learning and motivation. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 13(1), 1-17.
- Grant, D. A. et Berg, E. (1948). A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. *Journal of Experimental Psychology*, 38(4), 404-411. <https://doi.org/10.1037/h0059831>
- Greefrath, G., Koepf, W. et Neugebauer, C. (2017). Is there a link between preparatory course attendance and academic success? A case study of degree programmes in electrical engineering and computer science. *International Journal of Research in Undergraduate Mathematics Education*, 3(1), 143-167. <https://doi.org/10.1007/s40753-016-0047-9>
- Greve, K. W. (2001). The WCST-64: A standardized short form of the Wisconsin card sorting test. *The Clinical Neuropsychologist*, 15(2), 228-234. <https://doi.org/10.1076/clin.15.2.228.1901>
- Greve, K., Stickler, T., Love, J., Bianchini, K. et Stanford, M. (2005). Latent structure of the Wisconsin Card Sorting Test: A confirmatory factor analytic study. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 20(3), 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.acn.2004.09.004>
- Hake, R. R. (1998). Interactive engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66(1), 64-74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
- Hake, R. R. (2002). Relationship of individual student normalized learning gains in mechanics with gender, high-school physics, and pretest scores on mathematics and spatial visualization. *Physics education research conference*, 8(1), 1-14.
- Halloun, I. A. et Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53(11), 1056-1065. <https://doi.org/10.1119/1.14031>
- Hedges, L. V. et Nowell, A. (1995). Sex differences in mental test scores, variability, and numbers of high-scoring individuals. *Science*, 269(5220), 41-45. <https://doi.org/10.1126/science.7604277>
- Hestenes, D., Wells, M. et Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141-158. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- Houdé, O. et Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neurosciences*, 9, article 148. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00148>
- Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B. et 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. <https://doi.org/10.1162/089892900562525>
- Ivie, R. et Stowe, K. (2000). *Women in Physics, 2000*. AIP Report.
- Jones, C. R. (2021). Wisconsin card sorting test (WCST). Dans *Encyclopedia of autism spectrum disorders* (p. 5202-5204). Springer International Publishing.
- Kahle, J. B. (1994). Research on gender issues in the classroom. *Handbook of research on science teaching and learning*, 542-557. Macmillan.
- Kahneman, D. (2012). *Thinking, fast and slow*. Penguin Books.
- Kost, L. E., Pollock, S. J. et Finkelstein, N. D. (2009). Characterizing the gender gap in introductory physics. *Physical Review Special Topics. Physics Education Research*, 5(1), article 010101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.5.010101>

- Kwon, Y.-J. et Lawson, A. E. (2000). Linking brain growth with the development of scientific reasoning ability and conceptual change during adolescence. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(1), 44-62. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(200001\)37:1<44::AID-TEA4>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(200001)37:1<44::AID-TEA4>3.0.CO;2-J)
- Labudde, P., Herzog, W., Neuenschwander, M. P., Violi, E. et Gerber, C. (2000). Girls and physics: Teaching and learning strategies tested by classroom interventions in grade 11. *International Journal of Science Education*, 22(2), article 143157. <https://doi.org/10.1080/095006900289921>
- Lehto, J. E., Juujärvi, P., Kooistra, L. et Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 59-80. <https://doi.org/10.1348/026151003321164627>
- Lie, C.-H., Specht, K., Marshall, J. C. et Fink, G. R. (2006). Using fMRI to decompose the neural processes underlying the Wisconsin Card Sorting Test. *NeuroImage*, 30(3), 1038-1049. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.10.031>
- Liu, X. (2001). Synthesizing research on student conceptions in science. *International Journal of Science Education*, 23(1), 55-81. <https://doi.org/10.1080/09500690119778>
- Lorenzo, M., Crouch, C. H. et Mazur, E. (2006). Reducing the gender gap in the physics classroom. *American Journal of Physics*, 74(2), 118-122. <https://doi.org/10.1119/1.2162549>
- Lubin, A., Lanoë, C., Pineau, A. et Rossi, S. (2012). Apprendre à inhiber : une pédagogie innovante aux services des apprentissages scolaires fondamentaux (mathématiques et orthographe) chez des élèves de 6 à 11 ans. *Neuroeducation*, 1(1), 55-84.
- Malenfant-Robichaud, G. (2018). *Inhibition et capacité à surmonter certaines conceptions alternatives en chimie* [mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal]. Archipel. <https://archipel.uqam.ca/11334/>
- Maraver, M. J., Bajo, M. T. et Gomez-Ariza, C. J. (2016). Training on working memory and inhibitory control in young adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, article 588. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00588>
- Martín-Blas, T., Seidel, L. et Serrano-Fernández, A. (2010). Enhancing Force Concept Inventory diagnostics to identify dominant misconceptions in first-year engineering physics. *European Journal of Engineering Education*, 35(6), 597-606. <https://doi.org/10.1080/03043797.2010.497552>
- Masson, S. (2007). Enseigner les sciences en s'appuyant sur la neurodidactique des sciences. Dans P. Potvin, M. Riopel et S. Masson, *Enseigner les sciences : Regards multiples* (p. 308-321). Editions MultiMondes.
- Masson, S. et Borst, G. (2017). *Méthodes de recherche en neuroéducation*. Presses de l'Université du Québec.
- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M. et Brault Foisy, L.-M. (2014). Differences in brain activation between novices and experts in science during a task involving a common misconception in electricity. *Mind, Brain, and Education*, 8(1), 44-55. <https://doi.org/10.1111/mbe.12043>
- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M., Brault Foisy, L.-M. et Lafortune, S. (2012). Using fMRI to study conceptual change: Why and how? *International Journal of Environmental and Science Education*, 7(1), 19-35.
- McCullough, L. (2004). Gender, context, and physics assessment. *Journal of International Women's Studies*, 5(4), 20-30.
- Mears, M. (2019). Gender differences in the Force Concept Inventory for different educational levels in the United Kingdom. *Physical Review Physics Education Research*, 15(2), article 020135. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020135>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A. et Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" Tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Monchi, O., Petrides, M., Petre, V., Worsley, K. et Dagher, A. (2001). Wisconsin card sorting revisited: Distinct neural circuits participating in different stages of the task identified by event-related functional magnetic resonance imaging. *The Journal of Neuroscience*, 21(19), 7733-7741. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.21-19-07733.2001>
- Paivandi, S. (2015). Apprendre à l'université (p. 97-120). De Boeck Supérieur.
- Peterfalvi, B. et Vérin, A. (1996). Risques, dérives, faisabilités du travail d'obstacles en didactique. *Tréma*, 9-10, 123-136. <https://doi.org/10.4000/trema.2066>
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. et Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227. <https://doi.org/10.1002/sce.3730660207>
- Potvin, P. (2013). Proposition for improving the classical models of conceptual change based on neuroeducational evidence: Conceptual prevalence. *Neuroeducation*, 2(1), 16-43. <https://doi.org/10.24046/neuroed.2013020116>
- Potvin, P. (2019). *Faire apprendre les sciences et la technologie à l'école : épistémologie, didactique, sciences cognitives et neurosciences au service de l'enseignant*. Hermann.

- Potvin, P. et Cyr, G. (2017). Toward a durable prevalence of scientific conceptions: Tracking the effects of two interfering misconceptions about buoyancy from preschoolers to science teachers: Prevalence of conceptions about buoyancy. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(9), 1121-1142. <https://doi.org/10.1002/tea.21396>
- Potvin, P., Masson, S., Lafortune, S. et Cyr, G. (2015). 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. <https://doi.org/10.1007/s10763-014-9520-6>
- Potvin, P., Nenciovici, L., Malenfant-Robichaud, G., Thibault, F., Sy, O., Mahhou, M. A., Bernard, A., Allaire-Duquette, G., Blanchette Sarrasin, J., Brault Foisy, L.-M., Brouillette, N., St-Aubin, A.-A., Charland, P., Masson, S., Riopel, M., Tsai, C.-C., Bélanger, M. et Chastenay, P. (2020). Models of conceptual change in science learning: Establishing an exhaustive inventory based on support given by articles published in major journals. *Studies in Science Education*, 56(2), 157-211. <https://doi.org/10.1080/03057267.2020.1744796>
- Ramos-Galarza, C., Acosta-Rodas, P., Bolaños-Pasquel, M. et Lepe-Martínez, N. (2019). The role of executive functions in academic performance and behaviour of university students. *Journal of Applied Research in Higher Education*, 12(3), 444-455. <https://doi.org/10.1108/JARHE-10-2018-0221>
- Reilly, D., Neumann, D. L. et Andrews, G. (2015). Sex differences in mathematics and science achievement: A meta-analysis of National Assessment of Educational Progress assessments. *Journal of Educational Psychology*, 107(3), 645-662. <https://doi.org/10.1037/edu0000012>
- Runeson, S., Juslin, P. et Olsson, H. (2000). Visual perception of dynamic properties: Cue heuristics versus direct-perceptual competence. *Psychological Review*, 107(3), 525-555. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.107.3.525>
- Savinainen, A. et Scott, P. (2002). Using the Force Concept Inventory to monitor student learning and to plan teaching. *Physics Education*, 37(1), 53-58. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/1/307>
- Shtulman, A. et Valcarcel, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. *Cognition*, 124(2), 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.04.005>
- Smid, C. R., Karbach, J. et Steinbeis, N. (2020). Toward a science of effective cognitive training. *Current Directions in Psychological Science*, 29(6), 531-537. <https://doi.org/10.1177/0963721420951599>
- Smith-Seemiller, L., Arffa, S. et Franzen, M. D. (2001). Use of Wisconsin Card Sorting Test short forms with school-age children. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 16(5), 489-499. <https://doi.org/10.1093/arclin/16.5.489>
- Stein, M., Larrabee, T. G. et Barman, C. R. (2008). A study of common beliefs and misconceptions in physical science. *Journal of Elementary Science Education*, 20(2), 1-11. <https://doi.org/10.1007/BF03173666>
- Steinmetz, J.-P. et Houssemand, C. (2011). What about inhibition in the Wisconsin Card Sorting Test? *The Clinical Neuropsychologist*, 25(4), 652-669. <https://doi.org/10.1080/13854046.2011.568525>
- Styer, D. F. (1996). Common misconceptions regarding quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 64(1), 31-34. <https://doi.org/10.1119/1.18288>
- Taber, K. S. (2000). Multiple frameworks? Evidence of manifold conceptions in individual cognitive structure. *International Journal of Science Education*, 22(4), 399-417. <https://doi.org/10.1080/095006900289813>
- Taber, K. S. (2014). The significance of implicit knowledge for learning and teaching chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 15(4), 447-461. <https://doi.org/10.1039/C4RP00124A>
- Talanquer, V. (2006). Commonsense chemistry: A model for understanding students' alternative conceptions. *Journal of Chemical Education*, 83(5), 811. <https://doi.org/10.1021/ed083p811>
- Thibault, F. et Potvin, P. (2018). Executive function as a predictor of physics-related conceptual change. *Neuroeducation*, 5(2), 119-126. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180502.119>
- Tiberghien, A. (1997). Learning and teaching: Differentiation and relation. *Research in Science Education*, 27(3), 359-382. <https://doi.org/10.1007/BF02461759>
- Traxler, A., Henderson, R., Stewart, J., Stewart, G., Papak, A. et Lindell, R. (2018). Gender fairness within the Force Concept Inventory. *Physical Review Physics Education Research*, 14(1), article 010103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010103>
- Vanhoolandt, C., Dhyne, M. et Plumet, J. (2022). Mesure du raisonnement formel à l'entrée à l'université et évaluation académique des étudiants SVT : quelle cohérence ? [document soumis pour publication]. Département de physique, Université de Namur.
- von Aufschnaiter, C. et Rogge, C. (2010). Misconceptions or missing conceptions? *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 6(1), 3-18. <https://doi.org/10.12973/ejmste/75223>

- Von Korff, J., Archibeque, B., Gomez, K. A., Heckendorf, T., McKagan, S. B., Sayre, E. C., Schenk, E. W., Shepherd, C. et Sorell, L. (2016). Secondary analysis of teaching methods in introductory physics: A 50 k-student study. *American Journal of Physics*, 84(12), 969-974. <https://doi.org/10.1119/1.4964354>
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90018-3)
- Vosniadou, S., Pnevmatikos, D., Makris, N., Lepenioti, D., Eikospentaki, K., Chountala, A. et Kyrianakis, G. (2018). The recruitment of shifting and inhibition in on - line science and mathematics tasks. *Cognitive Science*, 42(6), 1860-1886. <https://doi.org/10.1111/cogs.12624>
- Wilkinson, H. R., Smid, C., Morris, S., Farran, E. K., Dumontheil, I., Mayer, S., Tolmie, A., Bell, D., Porayska-Pomsta, K., Holmes, W., Mareschal, D. et Thomas, M. S. C. (2020). Domain-specific inhibitory control training to improve children's learning of counterintuitive concepts in mathematics and science. *Journal of Cognitive Enhancement*, 4(3), 296-314. <https://doi.org/10.1007/s41465-019-00161-4>
- Willame, B. et Snauwaert, P. (2018). Entraînement au contrôle inhibiteur et apprentissage en chimie dans le secondaire supérieur : favoriser un changement de prévalence conceptuel. *Neuroeducation*, 5(2), 73-92.
- Zohar, A. et Sela, D. (2003). Her physics, his physics: Gender issues in Israeli advanced placement physics classes. *International Journal of Science Education*, 25(2), article 245268. <https://doi.org/10.1080/09500690210126766>