UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

RELATION ENTRE L'AFFECTIVITÉ ET L'APPRENTISSAGE DES NOTIONS DE PHYSIQUE MÉCANIQUE AVEC UN JEU SÉRIEUX CHEZ DES ÉTUDIANTS EN SCIENCES HUMAINES

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

MAITRISE EN ÉDUCATION (ÉDUCATION ET FORMATION SPÉCIALISÉES)

PAR

BIANCA ABBANDONATO

FÉVRIER 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je voudrais dans un premier temps remercier chaleureusement mon directeur, Monsieur Julien Mercier, professeur d'informatique cognitive à l'UQAM, pour sa disponibilité, son encadrement, ses judicieux conseils et surtout sa confiance en mes capacités de mener à bien ce projet de maîtrise.

J'adresse également mes plus sincères remerciements à tous les professeurs de mon parcours académique à la maîtrise qui m'ont inspiré par leurs paroles, leurs écrits et leur enseignement. Je tiens à remercier tout particulièrement Sophie Grossmann et Gustavo Barralobres pour leurs conseils et leurs critiques de mes travaux qui ont guidé mes réflexions, ainsi que leur temps généreusement donné pour répondre à mes questions durant mes recherches. J'aimerais également témoigner ma reconnaissance à Éric Dion et France Capuano, membres du jury, qui ont su corriger avec rigueur et partager des commentaires extrêmement pertinents pour améliorer ce travail.

Je remercie mon amoureux en or, Alexandre, pour ses encouragements constants et son soutien inconditionnel dans les moments les plus difficiles ainsi que ma très chère fille, Ariane, avec qui j'ai côtoyé les bancs universitaires de l'UQAM et qui a su me donner un bel exemple de persévérance et de détermination dans l'accomplissement de ses études et de ses projets de vie.

J'aimerais aussi remercier Geneviève Parent, collègue terminant sa maîtrise également, avec qui il a été possible de fixer des rencontres régulières et soutenues pour la rédaction de nos mémoires. Ensemble, nous avons réussi à trouver la motivation pour nous présenter à nos rencontres matinales même si le beau temps rayonnait dehors au cours de l'été! Merci Geneviève, on a réussi!

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à tous ceux et celles qui croisent ma route et qui contribuent à mon bonheur. Merci d'exister!

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ii

DÉDICACE iii

TABLE DES MATIÈRES iv

LISTE DES FIGURES vii

LISTE DES TABLEAUX viii

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES ix

RÉSUMÉ x

ABSTRACT xi

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE 3

1.1 Contexte général et spécifique 3

1.1.1 Les émotions en contexte scolaire 3

1.1.2 Apports potentiels d'une approche interdisciplinaire : L'éducation, la psychologie et les neurosciences 6

1.2 Problème scientifique 8

1.2.1 Pertinence sociale 9

1.2.2 Pertinence scientifique 9

1.3 Question générale et but de la recherche 11

CHAPITRE 2 CADRE DE RÉFÉRENCE 12

2.1 Posture épistémologique 12

2.2 L'apprentissage 13

2.2.1 Les quatre piliers de l'apprentissage 13

2.2.2 Le changement conceptuel 15

2.3 Les émotions 18

2.3.1 La psychophysiologie des émotions et le modèle circomplexe des émotions 19

2.3.2 Les émotions en contexte scolaire et le « Control-value theory of achievement emotions » 22

2.4 Le modèle du traitement prédictif 26

2.4.1 Le traitement prédictif et les émotions 28

2.4.2 Le modèle de prédiction-action et l'apprentissage 29

2.5 Intégration des modèles théoriques retenus 31

2.6 Questions et hypothèses de recherche 32
2.6.1 Activation psychophysiologique élevée 33
2.6.1.1 Activation psychophysiologique élevée et valence négative 34
2.6.1.2 Activation psychophysiologique élevée et valence positive 36
2.6.2 Activation psychophysiologique faible 36
2.6.2.1 Activation psychophysiologique faible et valence négative : 37
2.6.2.2 Activation psychophysiologique faible avec valence positive : 38

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 40

3.1 Échantillon 40
3.1.1 Présentation générale des données disponibles 40
3.1.2 Sélection des participants 40

3.2 Instruments de mesure 41
3.2.1 Force Concept Inventory 41
3.2.2 Outils de collecte des données psychophysiologiques 42

3.3 Devis de recherche 43
3.3.1 Description du jeu Mécanika 44
3.3.2 Déroulement de la séance de jeu 44

3.4 Préparation des données 45

3.5 Plan d'analyse des données 46
3.5.1 Traitement des données 46
3.5.2 Analyses quantitatives 47

CHAPITRE 4 RÉSULTATS 50

4.1 L'affectivité et le changement conceptuel 51

4.2 Quadrant de l'activation élevée et valence négative (QÉ-) 54
4.2.1 H1 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est négative, le participant apprend moins efficacement (superficiellement) ou pas du tout. Il n'y a pas de changement conceptuel. 56
4.2.2 H2 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est négative, des changements conceptuels non souhaitables sont également notés. 56

4.3 Quadrant de l'activation élevée et valence positive (QÉ+) 56
4.3.1 H3 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est positive, le changement conceptuel est favorisé. 58
4.3.2 H4 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est positive, le changement conceptuel a déjà eu lieu et est maintenu. 59

4.4 Quadrant Activation faible et valence négative (QF-) 59
4.4.1 H5 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative ne permet pas de changement conceptuel. 61
4.4.2 H6 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative indique que le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu 61
4.4.3 H7 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative est un indicateur d'une dégradation du changement conceptuel 61

4.5 Quadrant de l'activation faible et valence positive (QF+) 62
4.5.1 H8 : La combinaison de l'activation faible avec une valence positive est enregistrée lorsque le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu. 62

CHAPITRE 5 DISCUSSION 64

5.1 La relation entre l'affectivité et le changement conceptuel 64

5.2 Activation élevée et valence négative (QÉ-) 65

5.3 Activation élevée et valence positive (QÉ+) 67

5.4 Activation faible et valence négative (QF-) 68

5.5 Activation faible et valence positive (QF+) 69

CHAPITRE 6 CONCLUSION 71

6.1 Faits saillants du projet de recherche 71

6.2 Limites et biais de l'étude 72
6.2.1 Les limites méthodologiques 73
6.2.1.1 Contexte de l'étude et outils de mesure disponibles 73
6.2.1.2 Transformations des données et données nichées 74
6.2.2 Les biais possibles 76
6.2.2.1 Outils d'analyse et les définitions théoriques 76
6.2.2.2 Mécanika 77

6.3 Perspectives de recherche 77

RÉFÉRENCES 81

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Résumé visuel du processus du changement conceptuel 15

Figure 2.2 Modèle dynamique du changement conceptuel (Nadelson *et al.*, 2018) 18

Figure 2.3 Modèle circomplexe des émotions (Russel *et al.*, 1980) 21

Figure 2.4 Diagramme du CVT pour l'anxiété des mathématiques (Klee *et al.*, 2022) 25

Figure 2.5 Représentation visuelle du traitement prédictif (Lupyan et Clark, 2015) 27

Figure 3.1 Exemple de question du FCI 42

Figure 3.2 Visualisation du processus d'analyse 48

Figure 4.1 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel pour l'intensité affective moyenne 53

Figure 4.2 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel pour l'intensité affective moyenne QÉ- 55

Figure 4.3 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel de l'intensité affective moyenne QÉ+ 58

Figure 4.4 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel de l'intensité affective moyenne QF- 60

Figure 4.5 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel pour l'intensité affective moyenne QF+ 63

Figure 6.1 Vecteurs d'intensités équivalentes après transformation en variable catégorielle, mais de positions différentes 75

Figure 6.2 Schéma d'un pic d'activation psychophysiologique 78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Taxonomie des émotions d'accomplissement en contexte scolaire (Pekrun *et al.*, 2023) 23

Tableau 2.2 Tableau récapitulatif des hypothèses en fonction du modèle circomplexe 39

Tableau 3.1 Rappel des hypothèses en fonction du modèle circomplexe 47

Tableau 3.2 Transitions et hypothèses associées 49

Tableau 4.1 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel pour l'intensité affective moyenne 53

Tableau 4.2 Rappel, hypothèses associées à chacun des quadrants du modèle circomplexe 54

Tableau 4.3 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel pour l'intensité affective moyenne QÉ- 55

Tableau 4.4 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel de l'intensité affective moyenne QÉ+ 57

Tableau 4.5 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel de l'intensité affective moyenne QF- 60

Tableau 4.6 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel de l'intensité affective moyenne QF+ 62

Tableau 5.1 Rappel des hypothèses et de leur statut de validation 64

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CVT	Control-value theory of achievement emotions
EEG	Électroencéphalogramme
FAA	Asymétrie frontale de la puissance des ondes alpha
FCI	Force concept inventory
QÉ-	Quadrant d'activation élevée et de valence négative
QÉ+	Quadrant d'activation élevée et de valence positive
QF-	Quadrant d'activation faible et de valence négative
QF+	Quadrant d'activation faible et de valence positive
FFT	Transformation de Fourier Rapide

RÉSUMÉ

Contrairement aux recherches effectuées sur les émotions en contexte scolaire en lien avec la performance, les études concernant l'impact des émotions sur le processus d'apprentissage sont peu nombreuses. En utilisant un cadre théorique interdisciplinaire réunissant les sciences de l'éducation, la psychologie et les neurosciences éducationnelles, ce mémoire présente les résultats d'une étude dont la l'objectif principal est de déterminer si une relation existe entre l'affectivité et l'apprentissage avec Mécanika, un jeu sérieux en physique mécanique. Au total, les données secondaires de 74 étudiants en sciences humaines ayant peu de connaissance en physique mécanique sont retenues pour l'étude de leurs signaux d'activation psychophysiologique et de valence émotionnelle enregistrés lors d'une séance de jeu de deux heures. Les participants sont invités à manipuler les différentes forces (centripète, vent, gravité, etc.) puis à les combiner afin d'apprendre à déplacer un objet du point A au point B. Ils doivent choisir les bonnes forces à appliquer sur l'objet, leurs sources et leurs positions appropriées, afin d'accéder au niveau suivant. Les données recueillies par conductance électrodermale et par électroencéphalographie sont transformées en vecteur de l'affect circonscrit dans le modèle circomplexe des émotions représentant les différentes combinaisons d'activation et de la valence. L'intensité moyenne des vecteurs de l'affect est ensuite étudiée par quadrant du modèle circomplexe en fonction de l'apprentissage défini par le changement conceptuel. Celui-ci est évalué par la comparaison des réponses au pré-test et au post-test du questionnaire *The Force Concept Inventory* (FCI) (Hestenes *et al.*,1992) qui permet d'évaluer les connaissances scientifiques en physique mécanique. Les résultats montrent qu'il existe une relation entre l'affectivité et l'apprentissage dans Mécanika et que le maintien du changement conceptuel influence de façon significative les variations de l'affectivité. Ces observations semblent indiquer que les émotions d'activation élevée et de valence négative ne nuisent pas au maintien des connaissances scientifiques dans le cadre d'un jeu sérieux. L'étude de la résilience des participants face aux émotions négatives de forte activation lors d'activité d'apprentissage ainsi que l'analyse de l'affect des participants au moment où ils remplissent le questionnaire du FCI sont proposées afin de poursuivre le développement des connaissances sur la relation entre l'affectivité et l'apprentissage au moyen de mesures psychophysiologiques.

Mots clés : psychophysiologie de l'affect, modèle circomplexe des émotions, émotions d'accomplissement, changement conceptuel, apprentissage, traitement prédictif, conductance électrodermale, EEG.

ABSTRACT

The relationship between emotions and performance in school context is well documented, but studies concerning the impact of emotions on the learning process are scarce and this issue needs further investigation. Using an interdisciplinary theoretical framework bringing together education, psychology and educational neuroscience, this dissertation presents the results of a study whose main question is to determine whether a relationship exists between affectivity and learning with Mecanika, a serious game about Newtonian Physics knowledge. In total, secondary data from 74 undergraduate students with a novice background in Physics are used to study their learning process in relation to their psychophysiological activation and emotional valence signals recorded during a two-hour gaming session. The data recorded by electrodermal activity and encephalography are transformed into vectors of affect within the circumplex model of emotions representing the different combinations of activation and valence. The average intensity of the affect vectors is then studied by quadrant of the circumplex model according to conceptual change, which defines learning in the present study. Conceptual change is assessed by comparing answers to the pretest and posttest of the *The Force Concept Inventory* (FCI) questionnaire (Hestenes *et al.*,1992) which is used to evaluate knowledge in Newtonian Physics. The results show that there is a relationship between affectivity and learning in Mecanika and that maintaining conceptual change significantly influences variations in affectivity. These observations seem to indicate that negative emotions of high activation do not harm the maintaining of scientific knowledge in the context of a serious game. Additional research on personal resilience in the face of during learning activities as well as the study of the affect of participants when they complete the FCI questionnaire are suggested to pursue development of knowledge on the relationship between affectivity and learning.

Keywords: psychophysiology of affect, circumplex model of emotions, conceptual change, learning, predictive processing, electrodermal conductance, EEG.

INTRODUCTION

Ce travail de recherche propose d'examiner les signatures psychophysiologiques associées aux différents états affectifs lors de l'apprentissage des lois de la physique mécanique dans le cadre du jeu sérieux Mécanika. Son objectif principal est de contribuer au développement des connaissances dans le domaine de l'éducation sur la relation entre les émotions et l'apprentissage. L'émergence de ce projet prend racine dans la présence de certaines émotions en contexte académique qui peuvent entraver ou faciliter l'atteinte de certaines visées éducatives comme montré par les résultats d'études antérieures. Étonnamment, les recherches concernant l'impact des émotions sur le processus d'apprentissage lui-même sont peu nombreuses. Ces éléments de la problématique sont développés dans la première partie de ce travail.

Le cadre conceptuel de cette recherche est ensuite présenté et repose sur des éléments issus des sciences de l'éducation, de la psychologie et des neurosciences éducationnelles. Les concepts abordés incluent la psychophysiologie de l'affect avec le modèle circomplexe des émotions, le changement conceptuel pour clarifier le concept d'apprentissage et le traitement prédictif qui intègre ces éléments dans une perspective cognitiviste. Au total, huit hypothèses sont développées en fonction des combinaisons possibles entre la valence et l'activation psychophysiologique en prenant en considération les éléments du cadre théorique au regard de la relation possible entre l'affectivité et le processus d'apprentissage.

Afin d'évaluer la validité de ces hypothèses, une analyse multiniveaux a été effectuée sur les données secondaires issues d'une collecte faite dans le cadre d'une autre étude s'étant déroulée au Neurolab (UQAM). Ces données proviennent d'un échantillon de 82 étudiants en sciences humaines ayant peu de connaissance en physique mécanique. Lors de la séance de jeu de deux heures, les signaux d'activation psychophysiologique et de valence émotionnelle des participants sont enregistrés à l'aide de la conductance électrodermale et de l'électroencéphalographie. Ces données sont ensuite transformées en vecteur de l'affect qui est associé à l'un des quatre quadrants du modèle circomplexe des émotions. Par la suite, quatre tests statistiques différents sont effectués pour étudier la relation entre les vecteurs de l'affect consignés par quadrant et les quatre transitions possibles du changement conceptuel chez les participants. Ces transitons du changement conceptuel sont définies par la comparaison des réponses obtenues au pré-test et au post-test du questionnaire *The Force Concept Inventory* (FCI) développé par Hestenes *et al.* (1992) qui permet d'évaluer les connaissances scientifiques en physique mécanique. Par

exemple, si le participant n'a pas obtenu la bonne réponse au pré-test ni au post-test, ceci signifie qu'il n'y a pas eu de changement conceptuel.

Les résultats sont ensuite présentés et discutés. Ceux-ci montrent que certaines hypothèses sont validées. Cependant, certains résultats diffèrent face à la littérature scientifique consultée et permettent de conclure que les données issues de cet échantillon sont insuffisantes pour répondre à certains questionnements et hypothèses. Ces observations permettent de nourrir les réflexions sur les biais et les limites de cette étude en conclusion. De nombreuses perspectives de recherches sont également offertes dans l'espoir d'offrir des pistes d'études inspirantes pour les futures recherches dans ce domaine.

CHAPITRE 1
PROBLÉMATIQUE

Ce premier chapitre aborde le contexte général et spécifique menant à la réalisation de ce travail, le problème scientifique qui en découle et le but de la recherche. Pour ce faire, la problématique est développée de manière à convaincre le lecteur de la nécessité de la présente étude. Dans un premier temps, différentes facettes des émotions en contexte scolaire sont abordées afin de contextualiser ce travail. La présentation de certains résultats de recherches antérieures propose qu'il y ait encore beaucoup à faire pour étudier l'impact des émotions sur le processus d'apprentissage. Avec l'accès à de nouveaux outils de mesure psychophysiologiques, une approche interdisciplinaire mérite d'être considérée afin de réunir les expertises des domaines de l'éducation, des neurosciences et de la psychologie pour mieux répondre à la problématique. La pertinence sociale et scientifique est ensuite présentée pour conclure ce chapitre par l'énoncé de la question générale de recherche.

1.1 Contexte général et spécifique

1.1.1 Les émotions en contexte scolaire

Depuis près de 25 ans, les émotions sont considérées comme étant omniprésentes dans les milieux scolaires puisqu'elles font partie intégrante de la vie quotidienne de chaque être humain (Pekrun, 2016). Les émotions académiques font référence à l'ensemble des expériences affectives (plaisir, fierté, honte, etc.) qui sont directement liées au milieu scolaire (Pekrun et Perry, 2014). Le contexte académique est défini par plusieurs variables concernant l'apprenant, l'environnement, l'enseignant, les pairs, les activités d'apprentissage ainsi que les outils d'évaluation. La mise en relation des émotions avec toutes ces variables est un défi de taille, sans compter que leurs répercussions sur certaines visées éducatives, tels la réussite, l'abandon scolaire, la performance et l'apprentissage, est d'un grand intérêt pour le domaine de l'éducation. Tout récemment, Cobo-Rendón *et al.* (2023) rapportent que l'abandon des études universitaires est l'un des problèmes actuels de l'enseignement supérieur. Les auteurs mentionnent qu'au Chili, où cette étude fut menée, le taux d'abandon scolaire à l'université a augmenté de deux points de pourcentage en 2020, dépassant les 25 % (SIES, 2021). Leurs travaux se penchent sur la relation entre les émotions académiques et l'intégration scolaire des étudiants à l'université pour tenter d'offrir une explication à cette hausse. Leurs analyses confirment les résultats d'études antérieures montrant que les émotions positives pendant l'apprentissage et les évaluations sont corrélées avec une meilleure

adaptation scolaire lors de la transition à l'université alors que les émotions négatives prédisent l'intention de décrochage scolaire ainsi qu'une adaptation plus difficile lors de la transition aux études supérieures. Pour Cobo-Rendón *et al.* (2023), les impacts des émotions sur la performance, le bien-être, l'adaptation et la motivation des élèves en milieu scolaire sont indéniables et les recherches doivent se poursuivre pour augmenter les connaissances scientifiques sur ce sujet afin de soutenir les élèves dans le développement de leur plein potentiel.

Les travaux de Pekrun *et al.* (2017) montrent que les émotions académiques positives, tels le plaisir et la fierté, prédisent positivement les résultats obtenus en fin d'année dans les cours de mathématiques ainsi que la réussite des examens. Cette relation est établie dans les deux sens, c'est-à-dire que l'ensemble des réalisations scolaires contribuent à leur tour à la création et au maintien des émotions positives chez les élèves. En ce qui concerne les émotions négatives (colère, honte, ennui, désespoir), celles-ci sont corrélées négativement avec la réussite des examens, et les réalisations scolaires prédisent négativement ces émotions. Ces résultats proviennent de l'analyse de données recueillies sur plusieurs années scolaires en contrôlant les variables liées au sexe, à l'intelligence et à celles attribuées au statut socio-économique des élèves. Pekrun *et al.* (2017) sont d'avis que leurs conclusions soulignent l'importance des émotions pour la réussite des élèves et que les réalisations scolaires sont également importantes pour le développement des émotions.

Pekrun (2016) mentionne que les chercheurs en éducation ont eu tendance à négliger le rôle des émotions dans la vie scolaire des élèves, à l'exemption de phénomènes voisins mais distincts des émotions tels que l'anxiété en évaluation (test anxiety) et l'anxiété de performance (Pelch, 2018). Les effets négatifs de l'anxiété de performance ont été bien établis dans les recherches antérieures (Throndsen *et al.*, 2022). Elles ont démontré que d'autres phénomènes encore, tels que le stress et les inquiétudes ressentis, minent la performance dans les tâches d'apprentissage, notamment dans la résolution de problème (Hinze et Rapp, 2014 ; Fredericks *et al.* 2021). Ces phénomènes affectifs peuvent également engendrer chez l'apprenant des pensées intrusives d'évaluation de ses propres compétences, de jugements face à lui-même et d'inquiétudes reliées à une mauvaise performance (Hinze et Rapp, 2014). Pour revenir aux émotions, selon les résultats d'une recherche menée par Pelch (2018), la panoplie d'émotions négatives vécues en contexte académique participe à créer une image de soi négative, un manque de confiance en soi et une mentalité défaitiste. De plus, les travaux de Pelch (2018) montrent que les mauvaises performances scolaires seraient principalement liées à un éventail d'émotions négatives alors que les

émotions positives favorisent l'épanouissement d'une mentalité permettant de relever des défis, de créer de bonnes habitudes d'étude et de cultiver un sentiment de compétence, de confiance en soi et de sécurité en milieu scolaire. Bien qu'il paraisse évident que les émotions académiques positives sont préférables pour l'atteinte d'objectifs pédagogiques, quelques résultats de recherche ont également montré que certaines émotions négatives, telles la colère, l'anxiété et la honte, peuvent également être bénéfiques pour mobiliser l'apprenant à mettre en place des stratégies pour éviter l'échec (Pekrun et Linnenbrink-Garcia, 2022).

Une autre facette s'ajoute à la problématique que certaines émotions peuvent aider à promouvoir et atteindre certains objectifs scolaires alors que d'autres peuvent leur nuire. Comme exprimé dans les paragraphes précédents, la plus grande partie des recherches effectuées sur les émotions en contexte scolaire utilisent des concepts globaux pour décrire les émotions qui se déclinent principalement en émotions positives et négatives (Pekrun et Linnenbrink-Garcia, 2022). Ceci implique qu'il peut être difficile et potentiellement trompeur d'utiliser les résultats de recherches antérieures pour expliquer les liens trouvés entre les émotions et l'apprentissage des élèves dans des contextes académiques réels. Or, l'ensemble des états affectifs qu'il est possible d'associer aux émotions académiques possèdent des caractéristiques supplémentaires. Notamment, l'activation psychophysiologique, élevée, faible ou plutôt neutre, fait référence au niveau d'activation du corps lors de stimuli et permet de distinguer davantage les différentes émotions. Par exemple, le plaisir ressenti dans une activité d'apprentissage est une émotion positive d'activation élevée alors que l'assurance ressentie dans le travail à accomplir est également propre à une affectivité positive, mais d'activation plutôt faible.

La recension de la littérature scientifique de Tan *et al.* (2021) apporte une autre considération importante. Les auteurs mentionnent que plusieurs résultats de recherche sont disponibles sur les effets des émotions sur la réussite, l'abandon scolaire et la performance, cependant la relation entre les émotions et le processus d'apprentissage lui-même est peu étudiée. Soderstrom et Bjork (2015) soulignent que, bien que l'on puisse vouloir s'attarder à la performance scolaire, celle-ci n'est pas un indice fiable pour mesurer l'apprentissage. En effet, l'apprentissage est associé à des changements de comportements à plus long terme, permanents, associés à la rétention et au transfert de connaissances. De son côté, la performance est associée à des changements de comportements de courtes durées (Soderstrom, Bjork, 2015). De plus, il a été démontré qu'une amélioration des performances n'est pas garante d'un apprentissage. Par exemple, Soderstrom et Bjork (2015) présentent des résultats d'études sur l'apprentissage moteur qui ont

démontré que la pratique guidée, lors de tâches de coordination bimanuelle d'extensions des bras, engendrait moins d'erreurs de performance chez les participants, mais nuisait à l'apprentissage à long terme lorsque comparée au groupe n'ayant reçu aucune guidance. Ainsi les travaux de Soderstrom et Bjork (2015) rapportent que certaines manipulations axées sur la performance peuvent entraver le processus d'apprentissage dans certains contextes.

Lei et Cui (2016) suggèrent que les émotions académiques peuvent avoir un impact direct sur les stratégies adoptées par les élèves pour faire face aux situations scolaires, notamment sur la prise de décisions liées à l'apprentissage. Les résultats de l'enquête de Tan *et al.* (2021) montrent que les émotions académiques positives sont meilleures que les émotions académiques négatives pour améliorer les performances scolaires, cependant les auteurs mentionnent que leurs effets sur l'apprentissage n'ont pas été systématiquement étudiés jusqu'à maintenant. Tout récemment, les travaux de Sullins *et al.* (2024) montrent que les gains d'apprentissage des élèves ayant signalé une forte propension à la honte sont significativement plus faibles que ceux qui ont une faible propension à la honte. La relation des émotions académiques sur le processus d'apprentissage est connue, mais mérite d'être étudiée davantage avec de nouveaux outils technologiques maintenant à notre portée. L'apport d'une démarche interdisciplinaire semble être approprié pour permettre d'acquérir de nouvelles connaissances sur ce thème.

1.1.2 Apports potentiels d'une approche interdisciplinaire : L'éducation, la psychologie et les neurosciences

Thomas *et al.* (2019) mentionnent qu'un bon nombre des membres de la communauté scientifique affirment que la psychologie est la science la plus pertinente pour la compréhension des processus d'apprentissage et l'élaboration d'intervention en milieu scolaire. Cependant, bien qu'elle demeure le fer de lance de la recherche appliquée à l'apprentissage, la psychologie à elle seule n'arrive pas toujours à expliquer tous les aspects de l'apprentissage, notamment puisqu'elle ne prend pas en considération les contraintes biologiques issues du cerveau (Thomas *et al.* 2019 ; Mackey, 2019).

Les neurosciences éducationnelles sont un champ de recherche interdisciplinaire qui se penche sur ces contraintes biologiques et leurs interactions avec la cognition. Thomas *et al.* (2019) proposent que la psychologie puisse bénéficier, lorsque les données comportementales demeurent trop ambigües, de l'apport des neurosciences éducationnelles afin d'améliorer ses théories de l'apprentissage, avec certains éléments conceptuels concernant le fonctionnement cérébral. Ainsi la contribution des neurosciences

éducationnelles est en mesure d'enrichir certains cadres conceptuels de la psychologie pour expliquer certains changements de comportements associés à l'apprentissage.

Les mesures psychophysiologiques sont notamment utilisées en neurosciences pour étudier le fonctionnement émotionnel. Elles permettent de poursuivre l'élaboration et la validation de théories reliant l'interaction des processus cognitifs aux processus biologiques, sur une petite échelle de temps en secondes (Anderson, 2002 ; Potter et Bolls, 2011). L'arrivée de la neuro-imagerie a permis aux scientifiques de démontrer des corrélations entre l'activité cérébrale et plusieurs comportements de nature sociale, émotive ou développementale (Schwartz *et al.*, 2016). L'électroencéphalogramme (EEG) est notamment utilisé pour étudier la valence émotionnelle, c'est-à-dire la qualité positive ou négative d'une émotion. La conductance électrodermale est une autre mesure psychophysiologique qui permet de détecter la microsudation de la peau, notamment lorsque le cerveau détecte une menace dans l'environnement et déclenche la réponse biologique du « combat-fuite » (Potter et Bolls, 2011). La conductance électrodermale peut être utilisée comme marqueur psychophysiologique des émotions en contexte scolaire associées à différents degrés d'activation dans le corps. Ces instruments permettent donc d'étudier les variations émotionnelles sur une petite échelle de temps dans un contexte d'apprentissage.

La contribution des neurosciences ne s'arrête pas à l'observation et la mesure de diverses variables psychophysiologiques liées aux émotions. Elles apportent une compréhension différente du processus d'apprentissage. Au niveau cérébral, les travaux d'Anderson (2002) ont permis de faire évoluer le concept d'apprentissage, qui est intimement lié à plusieurs échelles de temps. Ces échelles permettent de modéliser temporellement les différentes étapes des processus cognitifs menant à l'intégration de notions et au changement de comportements. Avec ce modèle théorique, le processus d'apprentissage est lié à une architecture cognitive ancrée dans le corps biologique, qui débute avec une activation neuronale perceptible sur une échelle temporelle de 100 µs, 1 msec et 10 msec (Anderson 2002). Dans son article, Anderson (2002) s'appuie sur la Théorie de la Décomposition pour énoncer qu'une centaine d'heures sont nécessaires pour apporter un changement significatif dans l'acquisition de connaissances, de sorte que la décomposition d'une tâche d'apprentissage en petits blocs de savoir peut s'avérer importante. Anderson (2002) argumente que ces brèves périodes du processus cognitif, se déroulant en dixième de milliseconde, méritent toute notre attention pour améliorer l'apprentissage. Mercier et Charland (2013) proposent que les changements dans les processus neurologiques interviennent dans la modification du comportement de l'apprenant. Leurs travaux se penchent sur la superposition d'échelles de temps différentes qui

permettent de suivre l'évolution des mesures psychophysiologiques en secondes, en même temps que l'observation du comportement de l'apprenant se déroulant sur plusieurs heures. Mercier et Charland (2013) suggèrent que la compréhension du processus d'apprentissage doit être décortiquée en plusieurs niveaux temporels et physiologiques, chacun accompagné de la théorie pertinente. Ils abondent donc dans le même sens que Anderson (2002) sur la modélisation de ce processus et leurs travaux ont permis d'approfondir les signatures psychophysiologiques de l'apprentissage.

L'étude de l'affectivité dans le cadre d'un jeu sérieux conçu pour l'apprentissage des lois en physique mécanique permet de dégager plusieurs informations relatives à l'activation du système psychophysiologique (arousal) ainsi que la valence positive ou négative des émotions chez les participants. Ceux-ci sont des étudiants en sciences humaines au premier cycle universitaire. Ils sont invités à se familiariser avec différentes lois de physique mécanique à travers un jeu sérieux tout en étant reliés à divers équipements de mesure psychophysiologiques. Différentes variables sont captées et enregistrées chaque seconde dans l'intervalle de jeu de deux heures. De cette façon, il est possible d'étudier de plus près la relation entre l'émergence de stimuli perçus, l'affectivité et le comportement du participant, ainsi que son processus d'apprentissage sur une petite échelle de temps. Dans les prochaines sections de ce travail, il sera question de bien justifier pourquoi cette recherche dans le cadre du jeu sérieux est pertinente afin de participer à l'avancement de connaissances dans le domaine de l'éducation.

1.2 Problème scientifique

En examinant de plus près les signatures psychophysiologiques associées à l'affectivité lors de l'apprentissage des lois de la physique mécanique dans le cadre d'un jeu sérieux, ce travail de recherche a pour objectif de bonifier la compréhension du lien existant entre les émotions académiques et l'apprentissage. Bien que ce lien soit connu, il y a très peu d'études antérieures qui ont décrit les émotions en contexte scolaire par d'autres caractéristiques que leur valence positive ou négative (Pekrun et Linnenbrink-Garcia, 2022). Ensuite, très peu de recherches se sont attardées sur l'effet des émotions sur l'apprentissage qui se distingue de la performance. L'augmentation des connaissances dans le domaine de l'éducation sur la relation entre les émotions et l'apprentissage peut contribuer à clarifier la nature des émotions pouvant contribuer positivement à l'apprentissage ou au contraire nuire à celui-ci.

1.2.1 Pertinence sociale

Les travaux de Cobo-Rendón *et al.* (2023) montrent que les émotions académiques négatives prédisent l'intention de décrochage scolaire ainsi qu'une adaptation plus difficile lors de la transition aux études supérieures. Cette situation est d'autant plus inquiétante pour la relève en sciences pures où certaines émotions négatives agissant comme un frein pour la poursuite des études dans ce domaine chez des étudiants qui ont pourtant les capacités intellectuelles pour les réaliser (Molin *et al.*, 2021). Ainsi, les émotions négatives en contexte scolaire peuvent influencer l'intérêt des étudiants pour la poursuite de leurs études et participent à appauvrir la relève dans le domaine des sciences pures. Mason et Zaccoletti (2021) défendent que l'impact de cet appauvrissement se répercute au niveau national et international au fur et à mesure que l'être humain est confronté à des défis associés à la condition humaine, telle la distribution de l'eau et de la nourriture, le contrôle de la propagation des virus, la production d'énergie ou encore l'adaptation aux changements climatiques. L'étude de l'affectivité en milieu scolaire ainsi que son impact sur l'apprentissage semble d'une importance capitale pour le domaine de l'éducation.

Selon Soderstrom et Bjork (2015), le but principal de l'éducation est d'offrir le cadre et les outils nécessaires pour l'apprentissage à long terme. Dans un contexte où la performance n'est pas l'objectif premier de l'éducation, il semble pertinent de poursuivre les recherches centrées sur l'apprentissage plutôt que sur la performance (Watkins, 2010). Soderstrom et Bjork (2015) avancent que la poursuite des études permettant la distinction entre la performance et l'apprentissage est fondamentale, que cette distinction est possible, et que les implications pour les théories, les recherches et les pratiques en éducation sont énormes.

1.2.2 Pertinence scientifique

Aujourd'hui, avec l'accès à de nouveaux outils de mesures psychophysiologiques, il est maintenant possible d'étudier l'affectivité en contexte d'apprentissage à travers l'activité du système nerveux périphérique et central. Les neurosciences éducationnelles proposent une démarche qui minimise la dépendance des questionnaires autorapportés sans toutefois les éliminer complètement (Gardhouse et Anderson, 2013). Une nouvelle méthodologie pour les travaux de recherches est maintenant disponible et elle s'avère différente de celles proposées par la psychologie. Selon Gardhouse et Anderson (2013), le design du cadre conceptuel concernant les émotions doit intégrer trois composantes : les mesures psychophysiologiques, les questionnaires autorapportés ainsi que l'observation des comportements. Leurs propos sont appuyés par Morris et Sah (2016), qui prônent une approche intégratrice afin de

concevoir des cadres théoriques en fonction des variables psychophysiologiques d'intérêts. La recension de la littérature scientifique faite par Jiménez-Mijangos *et al.* (2022) expose que l'intégration de mesures psychophysiologiques est très limitée pour étudier certaines émotions en milieu scolaire, avec les principaux outils utilisés demeurant propres au domaine de la psychologie avec des questionnaires autorapportés. De plus, Morris et Sha (2016) soulignent que les nouveaux modèles d'apprentissage issus des neurosciences de l'éducation ont eu peu d'impact sur les pratiques en classe jusqu'à maintenant.

Il est indéniable qu'à ce jour la psychologie a grandement influencé la pédagogie et les interventions en milieu scolaire (Morris et Sha, 2016). Les travaux de cette recherche s'inscrivent dans une démarche interdisciplinaire entre les neurosciences éducationnelles, la psychologie et l'éducation. Cette étude est pertinente au niveau scientifique pour participer à la construction de « ponts » entre ces disciplines et prendre part à l'avancement des connaissances sur le lien déjà connu, mais peu étudié, entre l'affectivité et l'apprentissage. Les données accessibles pour faire cette étude proviennent d'instruments de mesure psychophysiologiques, soit l'électroencéphalogramme et la conductance électrodermale. Avec la combinaison du questionnaire autorapporté rempli au pré-test et post-test au sujet des connaissances scientifiques des participants, cette recherche combine les éléments souhaitables dans une étude en neurosciences de l'éducation : l'étude du comportement, l'étude des variables psychophysiologiques et le questionnaire autorapporté (Gardhouse et Anderson, 2013). Cependant, le témoignage subjectif du participant concernant son affectivité n'a pas été consigné. Ceci aurait permis de suivre de façon irréprochable les recommandations Gardhouse et Anderson (2013). Ce point est discuté ultérieurement dans les limites de cette étude.

Il reste également à considérer comment mesurer quantitativement l'impact de l'affectivité sur l'apprentissage dans le cadre d'un jeu sérieux en physique. Ceci demande de se pencher sur le concept d'apprentissage à travers les neurosciences. La définition du processus d'apprentissage et l'identification de ses déterminants, tels que vus par le milieu de l'éducation, sont toujours en évolution. Elle comporte un véritable défi face à la complexité des mécanismes cognitifs, affectifs et sociaux impliqués, tous reliés temporellement sur des échelles différentes. La valeur ajoutée de l'utilisation d'instruments de mesure psychophysiologiques pour la cueillette de données permet d'obtenir de l'information objective et indépendante de la perception, des croyances ou des biais des participants. Ceci est vrai, autant pour les variables psychophysiologiques concernant l'affectivité, que pour leurs effets sur le processus d'apprentissage du participant.

Poursuivre les recherches sur la relation entre l'affectivité et l'apprentissage demeure une priorité puisque les résultats à long terme des programmes éducatifs dépendent de l'apprentissage associé à des changements de comportements relativement permanents (Soderstrom et Bjork, 2015). Les retombées potentielles de l'étude de l'impact de l'affectivité sur la cognition et le processus d'apprentissage sont multiples. Parmi ces retombées, il y a l'évolution des outils de dépistage des émotions en contexte scolaire, l'augmentation de l'efficacité des interventions en classe pour la gestion des émotions et l'amélioration des activités d'apprentissage qui évitent de favoriser la performance. Pelch (2018) mentionne également la création d'outils pouvant aider à cultiver des émotions académiques plus positives afin de possiblement aider les élèves à développer une meilleure résilience et une autorégulation plus efficace face aux émotions négatives. Ces moyens peuvent également aider à créer des conditions plus favorables pour améliorer les habitudes d'étude et participer à une meilleure image de soi en milieu scolaire pouvant aider à contrer les envies de décrochage.

1.3 Question générale et but de la recherche

Dans sa forme la plus concise, la question générale qui sous-tend ce projet de recherche est formulée ainsi : quel est l'impact de l'affectivité sur l'apprentissage ? Le but de cette recherche est d'approfondir les connaissances sur la relation entre l'affectivité et l'apprentissage par le biais de mesures psychophysiologiques. Ces mesures permettent d'obtenir les signaux du corps reliés aux composantes de l'affectivité qu'il sera possible de quantifier afin d'approfondir leur effet sur l'apprentissage.

CHAPITRE 2
CADRE DE RÉFÉRENCE

Dans ce chapitre, le cadre conceptuel se décline sur les thèmes suivants : l'apprentissage, les émotions et le modèle du traitement prédictif afin d'intégrer les deux premiers éléments dans une vision incarnée de la cognition. Ceux-ci correspondent aux trois principaux éléments qui permettent de faire les liens entre l'affectivité et l'apprentissage nécessaire dans le cadre de cette étude. Pour terminer, la présentation des différentes questions de recherches ainsi que les hypothèses sont présentées selon leur caractéristique d'activation psychophysiologique élevée ou faible.

Avant d'aborder les concepts du cadre théorique, un mot est écrit sur la posture épistémologique de ce travail. Le défi sera de réunir les éléments théoriques afin de déterminer quelles sont les signatures de l'apprentissage observables et quantifiables qu'il sera possible d'utiliser dans le cadre de cette étude en lien avec l'affectivité vécue par les participants.

2.1 Posture épistémologique

La posture postpositiviste, telle que définie par Fortin et Gagnon (2016), semble refléter la meilleure posture scientifique pour répondre à la question de recherche. En effet, le courant postpositiviste propose d'appréhender la réalité le plus objectivement possible tout en gardant en tête que les observations et l'interprétation des résultats ne sont pas ancrées dans une objectivité pure et peuvent générer des erreurs. Fortin et Gagnon (2016) précisent que cette posture fait appel au raisonnement déductif, du général au particulier, et qu'il est possible de fournir des explications de nature causale. La posture postpositiviste propose également une compréhension des phénomènes par l'analyse de leurs composantes. La majorité des recherches en neurosciences s'inscrivent dans une démarche réductionniste qui suppose que les processus cognitifs, comportementaux et émotifs sont ancrés dans la neurobiologie (Seth et Friston, 2016). Dans cette étude, des mesures psychophysiologiques sont utilisées pour identifier l'affectivité vécue par le participant lors du jeu en lien avec son apprentissage. Il s'agit bien d'une démarche réductionniste où les composantes psychophysiologiques sont utilisées pour déduire les processus émotifs et cognitifs chez l'apprenant. Toutefois, ce type d'étude permet le cumul d'évidences scientifiques propre aux pratiques fondées sur des résultats probants en éducation, qui permettent un réel progrès dans l'efficacité de l'enseignement.

2.2 L'apprentissage

Le behaviorisme, le cognitivisme et le constructivisme sont les trois paradigmes principaux issus de la psychologie en éducation (Agarkar, 2019). Selon le paradigme choisi, l'apprentissage ne revêt pas exactement la même définition et l'approche pédagogique est différente. Depuis plusieurs décennies, les recherches en sciences cognitives et en neurosciences se penchent sur le fonctionnement cérébral qui nous permet d'apprendre. La première partie de cette section se penche sur les travaux de Stanislas Dehaene (2018). Dans son livre l'auteur offre au lecteur un résumé du recensement de la littérature scientifique sur le processus d'apprentissage d'un point de vue des sciences cognitives traditionnelles. Ses références exhaustives permettent de résumer et vulgariser plusieurs concepts clés qui se retrouvent dans d'autres modèles théoriques de l'apprentissage. Après un bref résumé des piliers de l'apprentissage proposés par Dehaene (2018), quelques éléments pertinents sont soulevés pour le cadre de cette recherche, ainsi que certaines réserves à prendre en considération. Dehaene (2018) suggère un cadre théorique du processus cognitif de l'apprentissage reposant sur quatre piliers : l'attention, l'engagement actif, le retour sur erreur et la consolidation.

2.2.1 Les quatre piliers de l'apprentissage

Le premier pilier de l'apprentissage selon Dehaene (2018) est l'attention qui fait référence à l'ensemble des processus permettant au cerveau de choisir une information jugée pertinente pour ensuite l'amplifier et l'approfondir. Issus de notre évolution en tant qu'espèce animale, ces mécanismes attentionnels ont certaines fonctions clés, telles que « l'éveil et alerte, sélection et distraction, orientation et filtrage » (Dehaene, 2018, p.209). Le système attentionnel de l'alerte a pour fonction de spécifier « quand » il faut faire attention. Dehaene (2018) est d'avis que l'alerte pourrait être la plus ancienne des facettes de l'attention afin d'assurer notre survie à travers l'évolution. Activé par un danger perçu ou une émotion forte, le système d'alerte se met en marche et libère des neurotransmetteurs, telles la sérotonine et la dopamine, qui influencent la plasticité cérébrale à la source de l'apprentissage.

> Les chercheurs parlent d'un signal now print, « imprimez maintenant », comme si ces systèmes commandaient directement au cortex d'imprimer en mémoire le contenu actuel de l'activité neuronale. (Dehaene, 2018, p.215)

Pour Dehaene (2018), l'apprentissage ne peut avoir lieu sans attention. Celle-ci module les processus cognitifs permettant de faire l'accent sur les stimuli considérés importants.

Le deuxième pilier de l'apprentissage est celui de l'engagement actif. Il fait référence principalement à l'attitude personnelle de l'apprenant face à son processus d'apprentissage. Celui-ci doit être engagé activement et consciemment dans les tâches proposées afin de mobiliser les ressources cognitives nécessaires à l'apprentissage visé. L'apprenant a souvent besoin d'aide pour créer cet engagement de la part de son enseignant et de ses pairs en contexte scolaire.

Le retour sur erreur est le troisième pilier essentiel pour l'apprentissage, « Les deux termes sont virtuellement synonymes, car chaque erreur est une opportunité d'apprentissage. » (Dehaene, 2018, p.266). Le cerveau reçoit une quantité d'informations sensorielles qu'il analyse afin de faire des prédictions sur son environnement extérieur. Lorsque son calcul l'amène à réaliser qu'il y a une différence entre sa prédiction et les stimuli reçus, ceci génère une erreur de prédiction que le cerveau tentera de corriger. Cet apprentissage par correction d'erreurs permet au cerveau de moduler sa représentation du monde lui permettant d'améliorer ses prédictions et d'augmenter sa prévisibilité des événements futurs. « Apprendre, c'est réduire l'imprévisible. » (Dehaene, 2018, p.269). Commettre des erreurs serait donc normal et considéré comme l'une des sources de l'apprentissage.

Le dernier pilier est celui de la consolidation. Il fait référence aux processus cognitifs permettant le transfert de la mobilisation initiale du cortex préfrontal au début de l'apprentissage vers la mémoire à long terme. La consolidation de l'apprentissage permet de libérer les ressources cognitives initialement exigées par l'effort conscient pour passer à un stade d'automatisation inconscient et plus rapide. Cette consolidation est possible grâce à la pratique et la récupération régulière des nouvelles notions (retrieval) par le biais de petites évaluations régulières et un sommeil suffisant. En effet, Dehaene (2018) mentionne qu'il a été démontré que le sommeil améliore l'apprentissage en permettant un déplacement des informations enregistrées pendant la journée dans un espace plus efficace de la mémoire.

Pour la suite de ce travail, les concepts d'attention, d'engagement et de retour sur erreur seront approfondis à travers d'autres modèles théoriques pertinents pour cette recherche. Le modèle de Dehaene (2018) appartient aux théories en neurosciences qui considèrent le cerveau comme une machine ayant des caractéristiques similaires à celles d'un ordinateur (traitement d'information, computation, manipulation de symboles, prédiction, etc.). Les travaux de Meehan (2021) ne remettent pas en cause la validité des quatre piliers de Dehaene (2018), mais soulignent que celui-ci adhère à une théorie de la cognition internaliste, c'est-à-dire que tout se joue dans la tête, indépendamment du corps, des émotions

ou de l'environnement. Les quatre piliers semblent être une belle généralisation de l'approche cognitiviste de l'apprentissage, mais il est nécessaire d'élargir cette première partie du cadre en incluant des concepts qui viendront approfondir les mécanismes entre le corps et le cerveau lors des moments de l'apprentissage.

2.2.2 Le changement conceptuel

Un des modèles de l'apprentissage d'intérêt depuis les années 1970 auprès des chercheurs en science de l'éducation, en sciences sociales et en psychologie cognitive, est celui de la théorie du changement conceptuel (Heddy *et al.* 2018, Li *et al.*, 2022). Issu du paradigme constructiviste, ce modèle théorique de l'apprentissage est centré sur l'expérience quotidienne de l'étudiant face aux concepts enseignés (Mason et Zaccoletti, 2021) et s'avère approprié pour modéliser l'apprentissage en sciences (Vaughn *et al.*, 2020 ; Li *et al.*, 2022), surtout dans le cas de notions qui peuvent être liées à des expériences quotidiennes. L'apprentissage des sciences implique l'acquisition, la compréhension et le changement de conceptions scientifique approprié (Vaughn *et al.*, 2020).

Le changement conceptuel est l'ensemble des processus cognitifs qui viendront modifier les conceptions erronées de l'apprenant face à une notion enseignée. Lorsque les conceptions existantes de l'étudiant ne lui permettent pas de comprendre un nouveau phénomène scientifique présenté, l'étudiant ressent une insatisfaction et un conflit cognitif s'ensuit. Afin de résoudre ce conflit, une modification et une réorganisation des idées fausses ont lieu au niveau cognitif afin de permettre l'apprentissage des notions plus intelligibles et plausibles qui lui sont présentées (Li *et al.*, 2022). Il est possible de faire le rapprochement du conflit cognitif avec le concept d'erreur de prédiction évoqué par Dehaene (2018). Ainsi, un changement conceptuel est possible quand l'étudiant arrive à comprendre, donner un sens et utiliser correctement les concepts scientifiques qui lui sont enseignés à la suite d'un conflit cognitif.

Figure 2.1 Résumé visuel du processus du changement conceptuel

Bien que l'aspect cognitif soit essentiel pour ce changement, plusieurs résultats de recherches proposent que les modifications cognitives à elles seules sont insuffisantes pour créer un gain conceptuel et un

apprentissage à long terme (McLure *et al.*, 2020). Par conséquent, les chercheurs des différentes disciplines relatives à l'éducation en arrivent au constat que le changement conceptuel est multidimensionnel et ne se résume pas seulement à un processus cognitif (Li *et al.* 2022). McLure *et al.* (2020) résument certaines avancées théoriques du changement conceptuel depuis les vingt dernières années. Ce modèle conceptuel est maintenant composé des dimensions cognitives, ontologiques et intentionnelles de la part de l'apprenant. La facette ontologique du changement conceptuel prend en compte un ensemble de changements nécessaires dans la perception de l'apprenant face à l'essence complète d'un phénomène scientifique à la suite d'une nouvelle compréhension plutôt radicale. Par exemple, les objets physiques du quotidien sont appréhendés selon l'expérience personnelle comme ayant un poids, fait de matière et soumis à la gravité. L'apprentissage de certains concepts, tels que l'électricité ou encore la génétique, est particulièrement difficile pour les étudiants qui doivent changer leur référentiel quant à la nature ontologique de ces sujets qui n'appartiennent pas à la catégorie « objets de matière » (McLure *et al.*, 2020). Toutefois, le changement conceptuel issu des dimensions cognitives et ontologiques a toujours un effet limité sur l'apprentissage sans la dimension de l'intention, développée plus profondément par McLure *et al.* (2020). Les changements au niveau de l'attitude et des croyances de l'apprenant s'avèrent importants pour l'apprentissage (Li *et al.*, 2022). Le changement conceptuel par l'intention est possible (et nécessaire) lorsque l'apprenant est conscient des buts à atteindre, de ses croyances et de sa motivation intrinsèque qui le mobilise afin de se concentrer sur une tâche lui permettant de restructurer sa compréhension du phénomène. Ceci rejoint les propos de Dehaene (2018) sur le pilier de l'engagement où l'attitude personnelle de l'étudiant dans son processus d'apprentissage joue un rôle important.

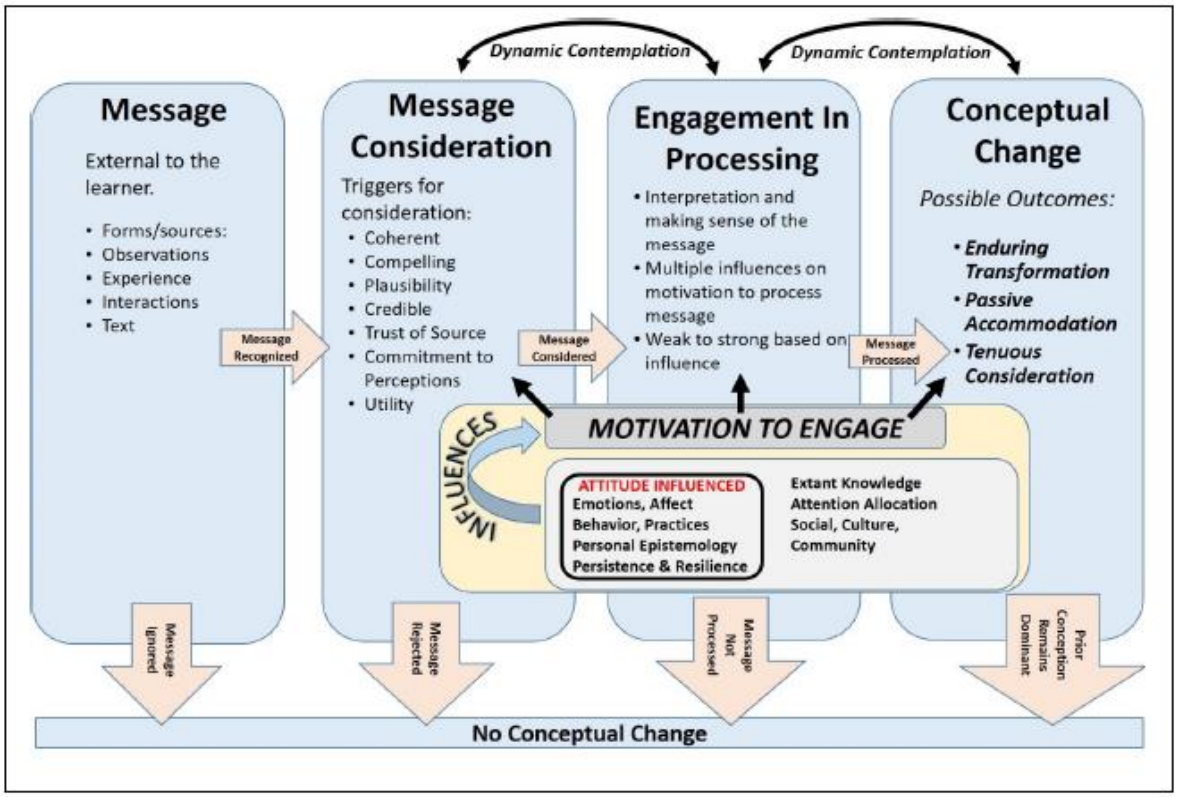
Plusieurs recherches empiriques récentes dans l'apprentissage des sciences proposent que le changement conceptuel multidimensionnel ne se résume pas par le remplacement des idées fausses par un ajout de connaissances plus véridiques et scientifiques. Il s'agit plutôt d'une réorganisation des idées erronées qui vont « côtoyer » les nouvelles connaissances dans la mémoire à long terme, influençant ainsi le raisonnement et la capacité de résolution de problème de l'étudiant (Mason et Zaccoletti, 2021). Possiblement en compétition, le déclenchement des réflexes cognitifs associés aux idées erronées peut alors être inhibé par l'individu. Les travaux de Mason et Zaccoletti (2021) se penchent sur les études neuroscientifiques qui appuient l'ajout de la dimension d'inhibition aux différents modèles du changement conceptuel, prenant en compte une différence individuelle possiblement importante dans l'apprentissage. Mais l'affinement du modèle ne s'arrête pas là, car d'autres variables individuelles méritent d'être prises

en considération et incluses dans le changement conceptuel, notamment les émotions (Nadelson *et al.*, 2018).

En effet, Nadelson *et al.* (2018) soulignent qu'un bon nombre de recherches ont été effectuées dans les 30 dernières années afin d'étudier l'impact de la motivation, des émotions, et des variables contextuelles et socioculturelles liées au changement conceptuel. Les travaux de Nadelson *et al.* (2018) se concentrent sur le changement conceptuel en incluant les variables d'interaction dynamique entre les dimensions propres à l'apprenant (ses processus cognitifs et émotifs, son engagement, ses croyances, etc.) et les dimensions propres à son environnement d'apprentissage (le contexte scolaire, les messages reçus, la nature du changement conceptuel, etc.). Bien que le présent projet de recherche ne prenne pas en considération l'ensemble de ces dimensions individuelles chez les participants, les travaux de Nadelson *et al.* (2018) permettent de poser des éléments du cadre théorique nécessaires entre les émotions et le changement conceptuels. Notamment, Nadelson *et al.* (2018) reprennent une hypothèse de Gill (2013) qui propose que les apprenants qui évaluent une nouvelle information en présence de stress perçoivent leur conflit cognitif comme étant un défi ou une menace de leurs croyances actuelles. Lorsqu'un apprenant perçoit le conflit comme un défi, son intention est mobilisée et le changement conceptuel serait alors possible. Dans le cas de la perception d'une menace, l'apprenant serait alors dans l'évitement de cette menace et ne mobiliserait pas son intention pour l'apprentissage.

Le modèle dynamique du changement conceptuel s'appuie sur de nombreuses recherches complémentaires (Nadelson *et al.*, 2018) qui mettent en lumière une multitude de variables en lien avec le processus du changement conceptuel associé à l'apprentissage des sciences (cf. Figure 2.2). Ce modèle proposé par Nadelson *et al.* (2018) tente d'illustrer la toile de variables interreliées, ainsi que leurs interactions, qui peuvent aboutir (ou pas) à un véritable changement conceptuel. Quoi qu'il en soit, il semble qu'il y ait un degré de complexité non négligeable dans l'élicitation ou le maintien du processus de changement conceptuel menant à un apprentissage réel qu'il ne sera pas possible d'adresser dans ce projet de recherche.

Figure 2.2 Modèle dynamique du changement conceptuel (Nadelson *et al.*, 2018)



Source : Nadelson, L., Heddy, B., Jones, S., Taasoobshirazi, G., & Johnson, M. (2018). Conceptual Change in Science Teaching and Learning: Introducing the Dynamic Model of Conceptual Change. *International Journal of Educational Psychology*, *7*, p.171.

Vaughn *et al.* (2020) soulignent qu'à leur connaissance, il n'y a pas encore de cadre théorique du changement conceptuel qui inclut les processus neuronaux et la contribution des neurosciences éducationnelle dans leur modèle. Pour fin de ce travail, bien que le cadre théorique doive être ancré dans une perspective cognitiviste, celui-ci nécessite l'inclusion de concepts qui permettront de faire des liens avec les processus émotifs liés au processus d'apprentissage défini par le changement conceptuel. La prochaine section se penche sur ces concepts au niveau des émotions avant d'aborder l'aspect du cadre théorique qui réunira un ensemble de concepts cognitifs et affectifs liés au processus d'apprentissage : le traitement prédictif.

2.3 Les émotions

La psychologie a toujours peiné à décrire de façon juste certains concepts significatifs liés à l'expérience humaine ancrée dans la rigueur scientifique (Anderson, 2002). Considérant « l'énormité » de l'expérience

humaine et nos présupposés liés à cette dernière, le défi est de taille, encore aujourd'hui (Anderson, 2021). La classification des émotions n'y échappe pas avec son processus subjectif dans le choix des mots pour décrire l'expérience d'une émotion (Gardhouse et Anderson, 2013). À l'intérieur même du champ d'études de l'affectivité en neurosciences, il y a divergence sur la définition des émotions et sur les distinctions au sujet des processus cognitifs, d'émotions des sensations ou d'états motivationnels (Quadt *et al.*, 2022). Cependant, il est possible de réunir certains concepts qui font consensus dans la communauté scientifique.

Il y a quatre critères clés définissant les émotions qui sont approuvées par la communauté scientifique (Sander, 2013). Premièrement, les émotions sont des phénomènes comportant plusieurs dimensions qui influencent la physiologie, le comportement et la cognition de l'individu. Ensuite, les émotions sont des processus en deux étapes : l'élicitation et la réponse émotionnelle. Les émotions sont également associées à un déclencheur pertinent et finalement, les émotions sont brèves comparativement à d'autres phénomènes affectifs.

Ces quatre critères propres aux émotions sont partagés par les trois modèles dominants du concept des émotions, soit la théorie des émotions de bases, le modèle de l'évaluation des stimuli (appraisal) et le modèle circomplexe d'activation et de valence (Sander, 2013). Le modèle circomplexe permet de modéliser la gamme des émotions humaines en deux dimensions psychophysiologiques reconnues par la communauté scientifique : l'activation du système psychophysiologique (arousal) et la valence émotionnelle (Potter et Bolls, 2011 ; Sander, 2013).

Les mesures psychophysiologiques fournissent des données permettant d'évaluer ces deux dimensions plutôt qu'identifier quelle émotion est précisément vécue. Comme cette recherche s'intéresse aux mesures psychophysiologiques en lien avec l'affectivité, les concepts d'activation et de valence du modèle circomplexe sont développés dans la prochaine section avant de poursuivre avec les émotions en contexte scolaire.

2.3.1 La psychophysiologie des émotions et le modèle circomplexe des émotions

De nombreux travaux en neurosciences proposent que les processus cérébraux concernant le fonctionnement des émotions et de la cognition ne soient pas distincts : les émotions aident à construire la cognition et la cognition aide à former les émotions (Barrett, 2017). La psychophysiologie des émotions est un champ d'études interdisciplinaire qui étudie l'interaction entre le corps et les émotions à travers

l'activité du système nerveux périphérique. Plus précisément, la psychophysiologie des émotions cherche à mieux comprendre le lien entre les activités du système nerveux périphérique et le système nerveux central associé à la cognition, à l'aide de mesures psychophysiologiques (Potter et Bolls, 2011).

L'activation du système psychophysiologique est mesurée par la conductance électrodermale qui détecte les variations dans les propriétés de l'épiderme. De façon plus détaillée, les glandes eccrines produisent de la microsudation, associée à la détection d'une menace dans l'environnement, déclenchant la réponse biologique du « combat-fuite ». Cette microsudation produit un changement de résistance électrique à la surface de la peau qu'il est facile de détecter à l'aide d'électrodes. Les scientifiques s'entendent sur le fait que la conductance électrodermale permet d'étudier l'activation du système psychophysiologique en lien avec le fonctionnement des émotions (Potter et Bolls, 2011).

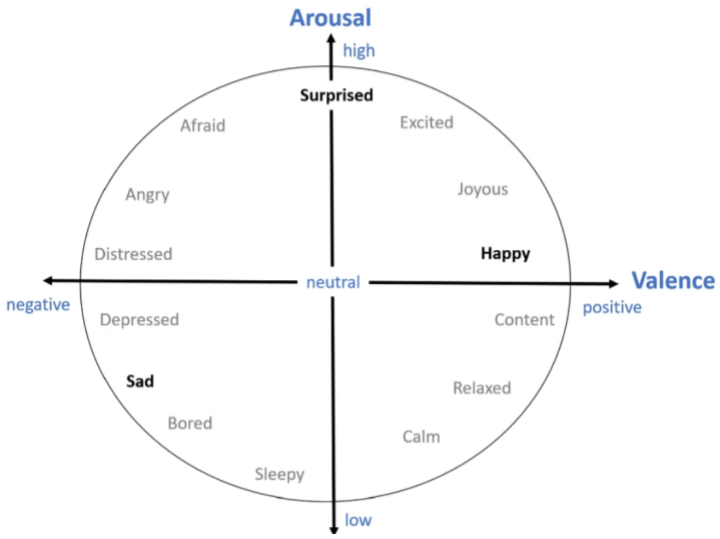
La valence fait référence à la qualité émotionnelle positive, négative ou neutre dans la perception et l'interprétation d'un stimulus chez l'individu. Selon Weisholtz *et al.* (2022), la valence est une caractéristique intrinsèque de l'expérience et de l'expression des émotions. Une valence négative est associée à un stimulus qui suggère une expérience désagréable, aversive ou répulsive, alors qu'une valence positive est associée aux effets d'une expérience désirable et plaisante. Les travaux de Weisholtz *et al.* (2022) les amènent à proposer que tout individu ait la capacité de percevoir rapidement la valence d'une grande variété de types de stimuli à travers les différents sens, qui peut également être associée à une grande complexité, telle l'appréciation d'une œuvre d'art.

L'utilisation de l'électroencéphalogramme (EEG) permet l'enregistrement de l'activité électrique associée à l'activité neuronale, notamment en lien avec des mécanismes cognitifs et affectifs de l'apprentissage. En 2019, Alarcão et Fonseca publient le résultat d'une enquête sur l'utilisation de l'EEG aux fins d'identification des émotions. Selon les résultats de leur enquête, Alarcão et Fonseca (2019) spécifient que les changements notés au niveau de l'asymétrie frontale de la puissance des ondes alpha (FAA) dans le cortex pré-frontal sont associés notamment aux processus émotifs. Une activation frontale droite relativement plus importante est associée à des émotions négatives tandis qu'une activation frontale gauche relativement plus importante est associée aux émotions positives (Alarcão et Fonseca, 2019). Les auteurs rapportent également que plusieurs études en neuropsychologie démontrent des corrélations entre les signaux de l'EEG et les émotions. Leurs propos sont appuyés par Wang et Wang (2021) qui spécifient qu'il s'agit de corrélations fortes, avec l'analyse de signaux de l'EEG possédant une fiabilité et

une efficacité supérieure pour d'identification des émotions comparées à certains autres instruments de mesure psychophysiologiques. Bien que l'utilisation de l'EEG nécessite de nombreuses électrodes placées à différents endroits de la tête, ceci permet d'offrir une excellente résolution temporelle, permettant aux chercheurs d'étudier les variations de signaux neuronaux associées à la valence en réponse à des stimuli émotionnels (Alarcão et Fonseca, 2019). Ainsi, l'EEG fournit une méthode fiable et privilégiée pour l'études des émotions (Abdel-Hamid, 2023)

Le modèle circomplexe reconnu par la communauté scientifique fut initialement développé par Russell (1980) pour l'analyse des émotions humaines. Il s'agit d'un modèle bidimensionnel combinant la valence émotionnelle sur l'axe horizontal et l'activation sur l'axe vertical pour former quatre quadrants permettant de décrire différentes émotions (Kumar *et al.*, 2023).

Figure 2.3 Modèle circomplexe des émotions (Russel *et al.*, 1980)



Source : Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, *39*(6), 1161-1178. https://doi.org/10.1037/h0077714

Par rapport aux émotions, les humeurs sont de plus faible intensité et il est parfois difficile d'identifier l'élément qui en serait la cause. De façon générale, les recherches portant sur les émotions utilisent l'appellation « affectivité » pour réunir l'ensemble des émotions et humeurs afin de décrire un état affectif positif (plaisir, fierté, satisfaction) ou un état affectif négatif (colère, anxiété, frustration) (Pekrun *et al.*, 2017). Ayant mentionné qu'il y a encore des dissidences sur la définition des émotions (Quadt *et al.*, 2022),

l'utilisation du terme « émotion » dans ce travail regroupe également les émotions à faible intensité relative à l'humeur, ce qui permet d'utiliser également le terme plus général d'« affectivité ».

2.3.2 Les émotions en contexte scolaire et le « Control-value theory of achievement emotions »

Les émotions peuvent donc être décrites comme étant des phénomènes multidimensionnels impliquant des ensembles de processus liés à des composantes affectives, cognitives, physiologiques, motivationnelles et expressives. Cependant, Pekrun *et al.* (2023) rappellent que l'expression psychophysiologique et comportementale des émotions peut varier d'une personne à l'autre. Selon les auteurs, les émotions doivent être considérées comme des épisodes affectifs probabilistes, qu'il est toutefois possible de modéliser comme des processus à plusieurs composantes pourvu que le modèle offre une certaine flexibilité. Pekrun *et al.* (2023) défendent que l'idéal soit de considérer un modèle où les différentes composantes affectives sont faiblement couplées, avec des frontières entre les émotions progressives plutôt que catégorielles, et avec les différentes émotions représentant des groupes d'épisodes affectifs partageant des propriétés fondamentales liées au contexte académique. En prenant en compte ces considérations, Pekrun *et al.* (2023) proposent que les émotions en contexte académique soient catégorisées à l'aide de trois dimensions : la valence, l'activation psychophysiologique ainsi que l'élément sur lequel l'élève se concentre et dirige son attention (*object focus*) (cf. Tableau 2.1). Les deux premières dimensions, activation et valence, font référence à celles du modèle circomplexe des émotions présentées plus tôt. Cependant, elles sont mises en contexte avec les activités et les réalisations scolaires. La troisième dimension, l'objet de l'attention des élèves, est un volet pertinent selon les auteurs afin de permettre la distinction de ces émotions en fonction de leur origine et de leur fonction (Pekrun *et al.*, 2023). Les auteurs soutiennent que ces trois dimensions capturent pleinement l'espace conceptuel des émotions de réussite et des réalisations académiques. Au total, Pekrun *et al.* (2023) propose une taxonomie permettant la distinction de douze émotions fondamentales en contexte académique exprimée à l'aide des trois dimensions. Selon ces chercheurs, la combinaison de ces trois dimensions est considérée à la fois comme nécessaire et suffisante pour conceptualiser les différentes émotions en contexte scolaire.

Tableau 2.1 Taxonomie des émotions d'accomplissement en contexte scolaire (Pekrun *et al.*, 2023)

	Positive		Negative	
Object focus	Activating	Deactivating	Activating	Deactivating
Activity	**Enjoyment** Excitement	**Relaxation**	**Anger** Frustration	**Boredom**
Outcome–prospective	**Hope** Anticipatory joy	**Assurance**	**Anxiety**	**Hopelessness**
Outcome–retrospective	**Pride** Retrospective joy Gratitude	**Relief** Contentment	**Shame/Guilt** Anger	**Disappointment** Sadness

Note. Bold entries = emotions included in the empirical studies.

Source : Pekrun, R., Marsh, H. W., Elliot, A. J., Stockinger, K., Perry, R. P., Vogl, E., Goetz, T., van Tilburg, W. A. P., Lüdtke, O., & Vispoel, W. P. (2023). A three-dimensional taxonomy of achievement emotions. *Journal of Personality and Social Psychology*, *124* (1), p.149

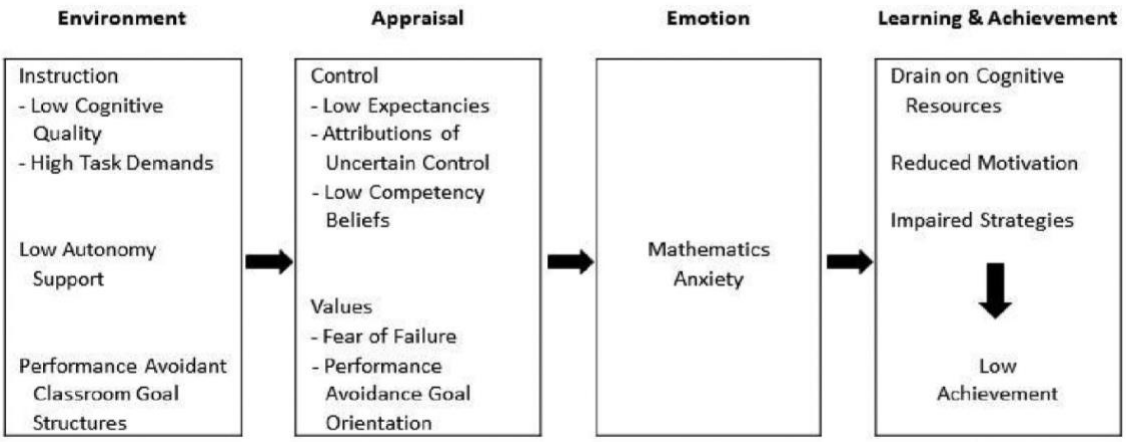
Pekrun *et al.* (2017) s'appuient sur un certain nombre de recherches pour proposer que les émotions d'activation élevée et de valence positive (plaisir, espoir, fierté) puissent participer à préserver les ressources cognitives. Ceci permettrait à l'apprenant de concentrer son attention sur la tâche d'apprentissage tout en contribuant à maintenir un intérêt lui permettant de faciliter un apprentissage en profondeur. À l'opposé, les émotions de faible activation et de valence négative (ennui, désespoir, déception) peuvent réduire les ressources cognitives et l'attention liée à la tâche. Ceci aurait pour effet de diminuer l'engagement de l'apprenant dans la tâche à accomplir et favoriserait le traitement superficiel de l'information au lieu d'un apprentissage réel (Pekrun *et al.* 2017). Pour ce qui est des groupes d'émotions d'activation faible et de valence positive (relaxation, assurance, soulagement), celles-ci peuvent réduire momentanément l'attention et l'effort sur le moment, mais permettraient d'inciter l'apprenant à reprendre l'apprentissage par la suite. En ce qui concerne les émotions d'activation élevée et de valence négative (colère, honte), Perkun *et al.* (2017) défendent qu'elles produisent un effet de réduction des ressources cognitives provoquées par des pensées intrusives non pertinentes et négatives. Quelques études mentionnent cependant qu'elles peuvent toutefois aider l'élève à se mobiliser afin d'éviter une situation d'échec (Pekrun et Linnenbrink-Garcia, 2022).

Le « Control-value theory of achievement emotions » (CVT) est le fruit de l'intégration des travaux de Pekrun (2006 ; 2018) et de nombreux autres chercheurs afin de modéliser l'effet des émotions en relation avec les accomplissements scolaires et l'apprentissage. Le CVT est présenté ici de façon succincte afin de

bonifier la compréhension du lecteur face à l'aboutissement de taxonomie de Pekrun *et al.* (2023) qui est utilisé dans ce projet de recherche pour la formulation des hypothèses et l'interprétation des résultats. Le CVT propose un cadre conceptuel permettant de comprendre la multitude d'émotions académiques (Shao *et al.*, 2023). Ce modèle suggère dans un premier temps que plusieurs variables de l'environnement influencent la perception et les croyances relatives au contrôle et au système de valeurs que l'étudiant s'approprie en situation scolaire. La combinaison des perceptions que l'étudiant se crée sur sa valeur personnelle, sa valeur en contexte académique et la quantité de contrôle qu'il peut exercer en contexte d'apprentissage est la source du déclenchement de ses émotions qui viennent influencer sa performance (Pekrun, 2006). Ces émotions influencent l'engagement et la réussite scolaires par le biais de plusieurs processus cognitifs, motivationnels et d'autorégulation, qui sont essentiels à la réussite dans les contextes scolaires, tels que l'intérêt, les ressources cognitives, la régulation de l'effort et l'utilisation de stratégies d'apprentissage (Pekrun 2006, 2018). Une des forces du CVT est que ce modèle intègre d'autres cadres théoriques contemporains pour modéliser les émotions en contexte scolaire (Klee *et al.,* 2022). L'engagement est nommé dans les sections précédentes de ce travail comme une composante essentielle pour l'apprentissage (Deheane, 2018) ainsi qu'un élément relatif au cadre théorique du changement conceptuel en ce qui concerne la dimension de l'intention, pour laquelle un engagement est nécessaire. Le CVT devient un cadre pertinent qu'il est possible d'associer au changement conceptuel pour venir appuyer la dimension de l'intention et faire un lien avec les émotions dans le contexte d'apprentissage.

Un exemple de l'utilisation du CVT est présenté dans le cas de l'étude de l'anxiété des mathématiques. Les étudiants croient habituellement que les mathématiques sont importantes (perception de valeur élevée), mais s'imaginent qu'ils n'ont pas les compétences pour bien réussir (perception de contrôle faible) (Klee *et al.*, 2022).

Figure 2.4 Diagramme du CVT pour l'anxiété des mathématiques (Klee *et al.*, 2022)



Source : Klee, H. L., Buehl, M. M., & Miller, A. D. (2022). Strategies for alleviating students' math anxiety: Control-value theory in practice. *Theory Into Practice, 61(1)*, p.51.

La taxonomie des douze émotions d'accomplissement en contexte scolaire proposée par Pekrun *et al.* (2023) s'appuie sur différents travaux de plusieurs chercheurs qui ont utilisé le CVT comme modèle théorique pour l'étude des émotions en contexte scolaire. De plus, la définition de cette taxonomie provient également des résultats des travaux récents de Pekrun *et al.* (2023) afin d'éprouver scientifiquement leur modèle. En effet, dans le cadre de quatre études empiriques portant sur des échantillons provenant de différents pays (Canada, États-Unis, Allemagne et Royaume-Uni), les auteurs ont examiné la robustesse empirique de la taxonomie proposée. Le CVT est utilisé notamment afin d'intégrer les différentes variables propres au modèle pour l'analyse de la validité de la taxonomie. Pekrun *et al.* (2023) démontrent que leur travail propose des résultats robustes montrant une forte validité interne et une forte validité externe de leur taxonomie en intégrant l'analyse des relations avec différentes variables associées au contexte scolaire soulevé par le CVT.

Les concepts qui ont été exposés jusqu'à maintenant offrent un portrait de la relation entre les émotions et l'apprentissage avec l'étudiant au centre de son expérience. Toutefois, il est souhaitable d'arrimer davantage les concepts cognitifs liés à l'apprentissage avec ceux liés aux émotions dans une volonté de poursuivre notre compréhension de l'être humain en tant qu'organisme complexe, possédant plusieurs dimensions indissociables ancrées dans un corps.

2.4 Le modèle du traitement prédictif

Historiquement, la perception fut associée à la détection d'un stimulus par les sens dont le signal remonte la chaine du système nerveux (Wilkinson *et al.* 2019). Une réponse cérébrale est engendrée à la suite de l'analyse de l'information reçue. Ce modèle « stimulus-réponses » du parcours de l'information à travers le système nerveux de façon ascendante dépeint le cerveau comme un engin de traitement des stimuli, d'analyse de leur sens et de création de la réponse motrice (ou autre) appropriée (Meehan, 2021). Les résultats des recherches en neurosciences ont démontré plutôt que les mécanismes cérébraux tentent d'abord de prédire l'information sensorielle et conçoivent le cerveau comme une machine de prédiction hiérarchisée. Lorsqu'un stimulus est capté par les sens, ce flot d'information est déjà accueilli par des signaux issus du système nerveux qui cherche à prédire le sens de l'expérience du corps (Wilkinson *et al.* 2019). Un ensemble d'observations issues des recherches récentes viennent appuyer le modèle du traitement prédictif et renforce l'idée que le modèle « stimulus-réponses » est inapproprié (Barrett, 2017).

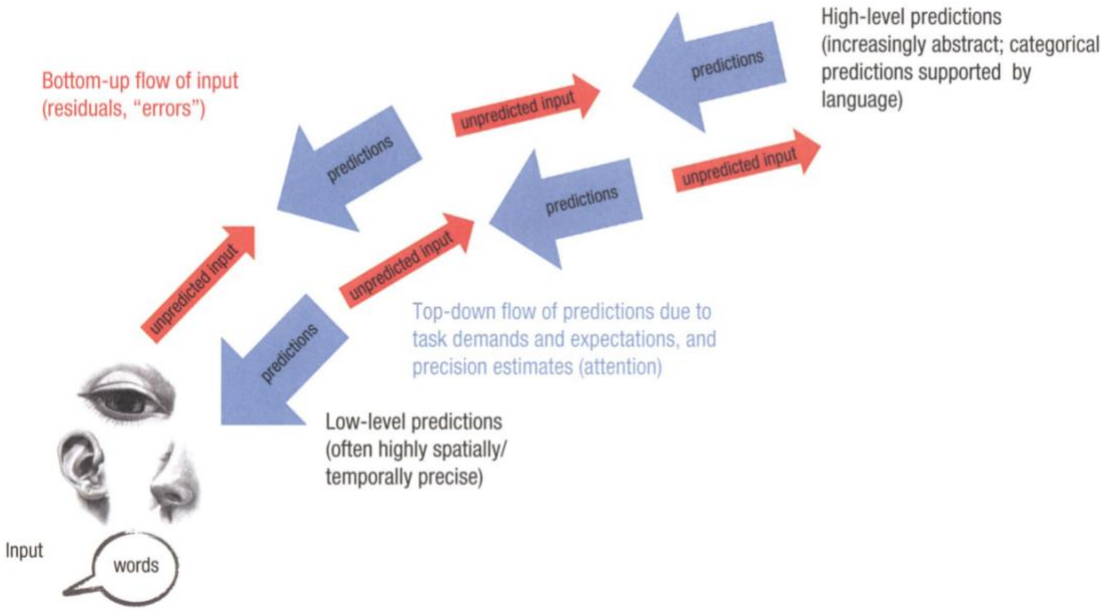
Le modèle du traitement prédictif (predictive processing) repose sur les résultats d'un bon nombre d'études en neurosciences cognitives qui définissent l'ensemble du cortex cérébral comme étant une machine de prédiction probabiliste (Miller et Clark, 2018). Une petite introduction a été présentée dans la section du troisième pilier de l'apprentissage de Dehaene (2018) lorsqu'il était question d'erreur de prédiction dans le processus d'apprentissage. Il s'agit ici d'approfondir le paradigme du traitement prédictif afin d'unifier les éléments théoriques de la cognition et des émotions dans le cadre de l'apprentissage. Le cadre théorique du traitement prédictif a comme ambition de réunir les concepts de perception, d'attention, de cognition, d'action et d'affectivité dans un même cadre conceptuel.

Une des fonctions principales du cerveau (dans le corps) est la prédiction, soit la capacité d'inférer les signaux du monde dans lequel il est situé (Clark, 2013 ; Barrett, 2017). Les niveaux supérieurs de la hiérarchie de prédiction sont associés à la cognition et aux différentes régions du cortex cérébral. Ces niveaux supérieurs possèdent des prémisses intégrées, façonnées par l'expérience vécue et l'environnement, qui permettent à l'individu de faire des inférences sur sa représentation du monde. Le processus « top-down » fait référence à la cascade de signaux parcourant le système nerveux qui sont issus des niveaux supérieurs. Ceux-ci tentent de prédire l'information reçue des différents stimuli perçus par les sens. Le processus d'ascension des stimuli provenant des niveaux inférieurs et qui remontent la chaine du système nerveux se nomme « bottom-up ». Ces signaux ascendants et descendants forment des cycles de prédictions/correction d'erreurs à travers les différents niveaux hiérarchiques à tout moment (Clark, 2013).

Les prédictions des niveaux supérieurs influencent les informations estimées des niveaux inférieurs en même temps que les signaux des niveaux inférieurs remontent la hiérarchie en influençant l'estimation et l'évaluation de ces stimuli par les niveaux supérieurs. Cette hiérarchie bidirectionnelle fait référence au processus de perception. Elle permet de générer une représentation du monde dynamique issue de prédictions pour expliquer les causes derrière l'information perçue par les sens (Clark, 2013 ; Barrett, 2017, Wilkinson *et al.*, 2019).

S'il y a divergence entre l'information reçue des niveaux inférieurs et les prédictions des niveaux supérieurs, il y a alors une erreur de prédiction. Une mobilisation du système survient alors pour réduire et corriger cette erreur. Cette correction peut prendre deux formes. La première consiste à créer un changement cognitif dans les niveaux supérieurs. Ceci se fait par une adaptation dynamique, sous forme de nouvel encodage qui permet de filtrer et sélectionner les stimuli de façon à améliorer le modèle de prédiction des niveaux hiérarchiques supérieurs (Clark, 2013). En d'autres mots « Le cerveau corrige ensuite sa représentation interne, en proportion directe de la force du stimulus et de la valeur de l'erreur de prédiction, afin que sa prochaine prédiction soit plus proche de la réalité. » (Dehaene, 2018, p. 268).

Figure 2.5 Représentation visuelle du traitement prédictif (Lupyan et Clark, 2015)



Source : Lupyan, G., & Clark, A. (2015). Words and the World : Predictive Coding and the Language-Perception-Cognition Interface. Current Directions in Psychological Science, 24(4), 279-284, p.280.

La deuxième possibilité pour réduire ou corriger une erreur est de modifier les signaux provenant des niveaux inférieurs à travers l'action. Miller et Clark (2018) proposent que la perception et l'action soient deux facettes complémentaires de la même fonction, soit la réduction d'erreurs. Clark (2013) propose que les fonctions du système moteur agissent de façon analogue à celles du processus de perception afin de maximiser la correspondance des signaux ascendants et descendants. L'action, provoquant le mouvement du corps, devient alors un deuxième moyen d'effectuer la correction d'erreurs afin de modifier les signaux ascendants dans le but de les faire correspondre aux résultats attendus du cerveau. L'action permet de « changer l'environnement » qui est ensuite perçu à nouveau par le corps.

Lorsqu'il n'y a pas de divergence et que les prédictions expliquent adéquatement les signaux perçus de l'environnement, aucune action n'est entreprise par le système, l'attention n'est pas mobilisée vers ces signaux prévisibles. Il s'agirait ici d'une capacité d'inhibition du système nerveux afin d'ignorer les signaux familiers qui correspondent aux prédictions (Clark, 2013). Seuls les signaux divergents de prédictions se rendent dans les niveaux supérieurs pour mobiliser une correction d'erreur.

2.4.1 Le traitement prédictif et les émotions

Selon Barrett (2017), les prédictions servent également à inférer les signaux provenant de l'intérieur du corps (intéroception). Le cerveau prédit et construit un modèle du monde également en fonction des besoins physiologiques du corps qui cherche à se réguler et à se stabiliser à travers les changements (allostasie). Des recherches récentes en neurosciences suggèrent que l'intéroception est intimement liée aux représentations internes du cerveau (les prédictions) et découle du processus d'allostasie (Barrett, 2017). Les sensations intéroceptives sont habituellement véhiculées par les dimensions de valence et d'activation psychophysiologique de l'affect regroupant les émotions, les sensations et l'humeur.

Les travaux de Barrett (2017) s'appuient sur la structure et le fonctionnement cérébral pour déduire les processus biologiques qui donnent naissance aux émotions. Selon Barrett (2017), les émotions sont des constructions de notre perception du monde, elles ne sont pas le produit de nos réactions. Considérant que plusieurs groupes de neurones ont la capacité de générer une émotion particulière (Barrett, 2017), les résultats de recherches d'une méta-analyse semblent confirmer que les différentes instances d'une émotion n'activent pas exactement les mêmes chemins neuronaux (Wilkinson *et al.*, 2019). De plus, plusieurs réseaux neuronaux s'activent régulièrement sans la présence d'aucun stimulus extérieur (Barrett, 2017). Barrett (2017) souligne que ces résultats provoquent plusieurs répercussions sur le concept des

émotions. Premièrement, il est alors peu probable que les différentes instances d'une émotion partagent les mêmes caractéristiques de base au niveau cérébral. Ensuite, il est peu plausible que la perception, la cognition et les émotions soient localisées dans des régions spécifiques du cerveau. Pour terminer, l'idée que la perception engendre les émotions est de moins en moins envisageable puisqu'il n'est pas possible de rattacher cette théorie à l'ensemble des processus cognitifs.

Les propos de Barrett (2017) sont appuyés par ceux de Wilkinson *et al.* (2019) qui rapportent les résultats d'une méta-analyse montrant qu'il n'y a pas de signature physiologique propre correspondant à une émotion précise. Selon Barrett (2017), les prédictions de la hiérarchie supérieures se préparent à l'action pour une situation donnée. Contextuellement, une émotion (par exemple la colère) sollicite différentes ressources du corps dans le but d'une action précise (la fuite, le combat physique, la confrontation verbale, etc.) (Wilkinson *et al.*, 2019). Les émotions et les sentiments sont alors expliqués comme étant le résultat du flot des erreurs de prédictions hiérarchisées composées des signaux intéroceptifs, proprioceptifs et extéroceptifs dans le but d'inférer ce qui se produit à chaque instant. Elles font partie du processus permettant de simuler les différents scénarios explicatifs des messages d'erreurs reçus et proviennent d'une évaluation ultérieure et cognitive des signaux physiologiques. Elles participent ainsi à mobiliser les ressources du corps pour générer une action (ou pas) et contribuent à nos perceptions (Wilkinson *et al.*, 2019) au service de l'allostasie (Barrett, 2017). Ainsi les émotions sont perçues comme étant la conséquence des erreurs de prédiction internes et externes qui participent à créer notre représentation du monde. L'instance d'une émotion est alors construite à l'aide de la combinaison des prédictions issues des prémisses de la hiérarchie supérieure et des signaux ascendants provenant des sens. Wilkinson *et al.* (2019) proposent alors que les émotions ne soient pas des réactions à l'environnement, mais émergent d'une façon analogue aux perceptions. Elles seraient ancrées dans un modèle prédictif qui tente de trouver les causes probables des signaux sensoriels en puisant dans le vécu antérieur afin de catégoriser l'expérience courante à l'aide d'un amalgame d'expériences passées de nature similaire (Wilkinson *et al.*, 2019).

2.4.2 Le modèle de prédiction-action et l'apprentissage

Le modèle du traitement prédictif a permis de fournir un cadre à travers lequel le concept des émotions est défini. Présentement, les recherches en neurosciences font bon train et le modèle du traitement prédictif a déjà évolué à la suite des résultats de recherches récentes. Ancré dans le traitement prédictif, le modèle de prédiction-action (active inference) permet d'expliquer les derniers éléments essentiels à ce

travail : l'apprentissage et l'ensemble des composantes du système nerveux en interaction, dont les émotions.

Il a été mentionné plus tôt que lors d'une erreur de prédiction, qui serait la source de l'instance d'une émotion, l'une des stratégies possibles est la modification de l'environnement à travers l'action. Plus spécifiquement, le modèle de prédiction-action propose qu'un cerveau humain possède sa représentation interne du monde dans lequel le corps est situé. Cette représentation a la capacité de simuler les données sensorielles que les hiérarchies supérieures de la cognition s'attendent à recevoir si cette représentation du monde interne est exacte (Smith *et al.*, 2020).

Le modèle de prédiction-action aborde les processus de perception, d'apprentissage et de décision comme étant des formes interdépendantes de prédiction hiérarchisée. Par exemple, dans le cas des prises de décisions, l'individu utilise de façon active son modèle interne pour générer des prédictions sur les éléments de son environnement et sur la conséquence de ces actions. De façon simultanée, il combine ce qu'il croit être ses meilleures hypothèses avec les prédictions des signaux issus des sens pour prendre une décision (pouvant modifier l'environnement à travers l'action). Ce processus d'inférence active permet de poser les actions nécessaires pour changer « l'état du monde » et ainsi de générer les signaux sensoriels désirés (par exemple, l'action de manger diminue la sensation de faim) (Smith *et al.*, 2022). Le processus de prédiction-action permet d'inférer les actions permettant de réduire les incertitudes dans l'environnement et serait la source de la fonction d'apprentissage. Alors que la perception est associée à des inférences issues des nouvelles observations en temps réel, l'apprentissage correspond à un processus plus lent, à la suite de plusieurs observations. L'apprentissage est le processus permettant la modification des croyances de base de la hiérarchie supérieure afin d'avoir un modèle interne probabiliste plus performant à long terme (Smith *et al.*, 2022).

La perception, l'apprentissage et le processus de décision partageraient ainsi une fonction commune, c'est-à-dire la réduction des erreurs de prédiction pour s'assurer d'avoir un modèle interne qui minimise les surprises et l'incertitude (Smith *et al.*, 2022). Ceci rejoint les propos de Barrett (2017) qui utilise le même paradigme face aux émotions. Barrett (2017) propose que ce modèle interne possède également ses hypothèses construites par les expériences émotionnelles du passé qui lui a permet de catégoriser et prédire les émotions ressenties. Dans son processus de prédiction hiérarchisée, le cerveau peut alors inférer les signaux ascendants relatifs à une catégorie d'émotion, ce qui permet à l'individu de percevoir

l'instance d'une émotion et de poser les actions nécessaires pour le maintien de l'allostasie. Ainsi, le modèle de prédiction-action, ancré dans le paradigme du traitement prédictif, offre un cadre unifié pour modéliser l'apprentissage et les émotions pour les besoins de cette étude.

2.5 Intégration des modèles théoriques retenus

Avant d'aborder la section suivante concernant la question de recherche et les hypothèses, cette partie du travail regroupe différents éléments des modèles théoriques présentés précédemment afin de clarifier et expliciter ce qui est retenu comme éléments du cadre conceptuel pour les besoins de ce projet. Dans un premier temps, l'apprentissage des notions de physiques mécaniques présenté dans le jeu sérieux Mécanika est évalué à l'aide du changement conceptuel issu du paradigme constructiviste en éducation. Le changement conceptuel est l'ensemble des processus qui permettent à l'apprenant de modifier les conceptions scientifiques erronées à la suite du conflit cognitif. Lors de la présentation d'un phénomène scientifique, un conflit cognitif chez l'apprenant a lieu s'il y a divergence entre ses connaissances antérieures et celles qui lui sont présentées (Li *et al.*, 2022). Les travaux de Naldeson *et al.* (2018) ont intégré les émotions comme variable pouvant influencer le changement conceptuel et cet apport est capital pour cette recherche dont l'objectif est d'approfondir la relation entre les émotions et l'apprentissage. Ceci nécessite donc dans un deuxième temps de clarifier la définition des émotions pour les besoins de cette étude et de les placer en contexte scolaire. Pour ce faire, le modèle circomplexe des émotions comprenant l'activation et la valence est utilisé et bonifié par les travaux de Pekrun *et al.* (2023) qui proposent une taxonomie de douze émotions en contexte scolaire associées à ce modèle.

Par la suite, dans un souci d'intégration de l'apprentissage et des émotions dans une vision incarnée de la cognition, la théorie du traitement prédictif permet de considérer l'appareil cognitif comme étant une machine de prédiction probabiliste. Ce cadre théorique définit les émotions comme étant le résultat du flot des erreurs de prédictions hiérarchisées composées des signaux intéroceptifs, proprioceptifs et extéroceptifs qui participent à créer notre perception du monde (Barrett, 2017). Elles font également partie du processus qui simule les différents scénarios explicatifs des messages d'erreur reçus qui sont rattachés également à l'apprentissage. Dans ce modèle, la source de l'apprentissage est associée à la procédure de prédiction-action qui permet d'inférer les actions permettant de réduire les incertitudes dans l'environnement. Ainsi, l'étude de l'affectivité à travers le jeu sérieux Mécanika permet aux participants de choisir les actions appropriées pour répondre aux différents messages d'erreurs perçus lors de la séquence de jeu. Actions, émotions, prédictions et apprentissages sont au rendez-vous pour

générer les données psychophysiologiques de nature affective qu'il sera possible d'analyser en relation avec le changement conceptuel en comparant les réponses au pré-test et au post-test au sujet de leurs connaissances scientifiques en physique mécanique.

2.6 Questions et hypothèses de recherche

L'objectif général de cette recherche est d'approfondir les connaissances sur la relation entre l'affectivité et l'apprentissage dans le cadre d'un jeu sérieux. Les différentes théories liées à l'apprentissage ainsi que ceux concernant les émotions suscitent un ensemble de considérations et de réflexions qui sont d'abord présentées afin de mieux définir la question de recherche principale. Cette question est ensuite accompagnée de sous-questions et d'hypothèses susceptibles d'apporter des connaissances supplémentaires de l'effet de l'affectivité sur l'apprentissage.

La théorie du traitement prédictif propose qu'à tout moment, des cycles de prédictions/correction d'erreurs soient à l'œuvre à travers les différents niveaux hiérarchiques. Ce processus hiérarchique bidirectionnel fait référence aux processus de perception et d'apprentissage, tous deux étant des aspects interreliés de la prédiction hiérarchisée (Smith *et al.*, 2022). Les erreurs de prédictions sont au centre de cette théorie et l'apprentissage aurait pour fonction première, au même titre que la perception, de réduire les erreurs de prédictions de façon à minimiser les surprises. La notion de surprise est importante, car l'ensemble du corps est alors en alerte et tente de maintenir son équilibre interne souhaité (Barrett, 2017).

Le modèle le plus récent du changement conceptuel développé par Nadelson *et al.* (2018) proposent que lors d'un conflit cognitif, l'apprenant perçoive la situation de deux façons. L'apprenant peut percevoir le conflit comme un défi et choisir de mobiliser ses ressources pour l'apprentissage ou il peut entrevoir le conflit comme une menace et décider de ne pas s'engager (Nadelson *et al.*, 2018). Ceci ressemble à la manifestation du « combat-fuite » qu'il est possible d'inférer à partir de mesures par encéphalographie, et plus particulièrement avec le calcul de l'asymétrie frontale de la puissance des ondes alpha (FAA) (Davidson, 2004). Une activation psychophysiologique élevée correspond à l'une ou l'autre de ces stratégies de survies. Il nous parait alors pertinent de vérifier ce que la dimension de valence peut apporter comme information supplémentaire pour déterminer si un apprentissage est possible. En combinant ces considérations avec la taxonomie de Pekrun *et al.* (2023) et le modèle CVT des émotions, nous sommes en mesure d'utiliser le modèle circomplexe des émotions en contexte scolaire pour formuler la question générale suivante :

Q : Est-ce que le changement conceptuel concernant la physique mécanique (lois newtoniennes) dans le cadre du jeu Mécanika est lié à l'affectivité ?

Afin de répondre à cette question, différentes sections seront développées pour permettre l'émergence de sous-questions et d'hypothèses qui sont considérées par la suite. Ces sections correspondent aux différentes combinaisons possibles de l'activation psychophysiologique et de la valence issues du modèle circomplexe des émotions. Ceci permet de bien identifier les éléments du cadre théorique permettant de réunir les concepts d'émotions et d'apprentissage à l'étude. Afin de structurer la lecture, le contenu est regroupé en deux catégories principales selon le degré d'activation psychophysiologique (*arousal*) qui sera principalement nommée *activation* pour la suite, par souci de simplification et pour éviter les anglicismes.

2.6.1 Activation psychophysiologique élevée

Le traitement prédictif propose un apprentissage par correction d'erreur, notamment à travers l'action (Smith *et al.*, 2022). Or, les erreurs de prédictions surviennent lorsqu'il y a une surprise, c'est-à-dire lorsqu'il y a une contradiction entre des signaux sensoriels ascendants et les prédictions des niveaux supérieurs. Le système attentionnel est alors déclenché par ces erreurs de prédictions qui sont accompagnées d'une activation plus élevée pour permettre au corps de se préparer à l'action. L'effet de surprise provoque également la libération de neurotransmetteurs qui influencent la plasticité cérébrale afin de permettre l'apprentissage (Dehaene, 2018). Barrett (2017) propose que les émotions soient générées par des erreurs de prédictions qui viennent mettre au défi notre représentation interne du monde. Il est donc également question d'activation plus élevée dans la gestion des émotions. Pour Pekrun *et al.* (2023), l'activation élevée permet une meilleure vigilance et facilite l'effort mental qui sous-tend l'action cognitive et comportementale.

Dans le cadre du jeu Mécanika, le participant doit apprendre à maitriser les notions de physique mécanique qui lui sont présentées pour réussir les différents tableaux. Selon le cadre du traitement prédictif, l'apprenant tente à tout moment de prévoir les actions qu'il doit poser dans le jeu pour avoir le résultat désiré. Il répète les cycles prédiction/erreur suivis de correction/action à travers le jeu. Son processus de prédiction-action lui permet d'inférer les actions permettant de réduire les messages d'erreur reçus et serait la source de sa fonction d'apprentissage (Smith *et al.*, 2022). Il est également en état d'alerte à ce moment et possède donc une composante d'activation plus élevée qu'au repos.

Le changement conceptuel propose que la source de l'apprentissage soit l'insatisfaction de l'apprenant face à un conflit cognitif. L'apprenant mobilise alors ses ressources pour être réceptif au nouvel apprentissage et restructurer sa compréhension d'un phénomène (Li *et al.*, 2022). Le conflit cognitif semble être synonyme d'erreur de prédiction, ce qui permet de croire que le changement conceptuel est possible lorsqu'il y a un certain degré d'activation relativement élevée. De plus, McLure *et al.* (2020) avancent que le changement conceptuel dépend également de la dimension de l'intention chez l'apprenant qui s'engage dans son processus d'apprentissage afin de modifier ses conceptions erronées. Cette mobilisation des ressources internes pour apprendre est également synonyme d'une activation plus élevée.

Une activation psychophysiologique plus élevée se traduit notamment par une variation des paramètres physiologiques associés au rythme cardiaque, à la respiration et à la conductance électrodermale. Cette activation physiologique prépare l'organisme à l'action et au maintien de cette action. Elle mène également à un état de vigilance permettant de faciliter les processus mentaux responsables de l'action cognitive et de ses manifestations comportementales (Pekrun *et al.*, 2023). La désactivation facilite le retrait de l'action.

Ayant clarifié les éléments du cadre associés à l'activation élevée, il est maintenant possible de considérer son lien avec les deux dimensions de la valence afin de proposer des questions et des hypothèses relatives aux différentes combinaisons possibles entre l'activation psychophysiologique et la valence émotionnelle.

2.6.1.1 Activation psychophysiologique élevée et valence négative

Selon le modèle du CVT, les émotions en contexte scolaire telles que la colère, l'anxiété ou la honte sont associées à une activation élevée combinée avec une valence négative (Pekrun *et al.*, 2023). Les émotions en contexte scolaire dépendent notamment du résultat attendu de l'apprenant. L'inférence du résultat attendu issu d'une activité scolaire s'inscrit dans le modèle du traitement prédictif. Dans le cas de la prévision d'un échec, les prédictions de la hiérarchie supérieures se préparent à l'action pour gérer cette situation (Barrett, 2017) qui doit être évitée, afin de s'assurer de maintenir un modèle interne qui minimise les surprises et l'incertitude (Smith *et al.*, 2022). En considérant également les propos de Nadelson *et al.* (2018) et Gill (2013), une activation élevée avec une valence négative est possiblement associée à la perception du conflit cognitif comme une menace lors du moment d'apprentissage. Ces auteurs proposent

la même conclusion que Barrett (2017) : cette menace doit être évitée. La conséquence serait alors que l'apprenant ne mobilise pas ses ressources pour l'apprentissage, ce qui ne permet pas de changement conceptuel ou seulement un changement superficiel. Ces considérations du cadre théorique mènent à l'hypothèse suivante :

H1 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est négative, le participant apprend moins efficacement (superficiellement) ou pas du tout. Il n'y a pas de changement conceptuel.

En comparant les réponses des participants au pré-test et post-test sur leurs connaissances des lois newtoniennes, il sera possible d'étudier la relation entre la combinaison d'activation élevée avec la valence négative sur le changement conceptuel. Pour une notion de physique mécanique évaluée au pré-test qui est erronée, cette hypothèse propose que la réponse au post-test soit également fausse lorsque le participant ressent des émotions d'activation élevée et de valence négative. Le participant aux prises avec de l'anxiété, de la honte ou de la colère, perçoit une menace et n'apprécie pas le défi proposé par la tâche à faire. Par conséquent, il ne mobilise pas ses ressources pour l'apprentissage. Cette forme de fuite est notée comme peu ou pas de changement conceptuel lors de cette expérience qu'il est possible de vérifier par la comparaison des questionnaires.

Sachant que les effets négatifs de l'anxiété de performance ont été bien établis dans les recherches antérieures (Throndsen et al, 2022) et qu'il est possible de penser que les émotions d'activation élevée et de valence négative peuvent avoir des conséquences sur le processus d'apprentissage, la prise en compte de ces considérations mène à la question et l'hypothèse suivantes :

Q : Lors d'une activation élevée combinée à une valence négative, pourrait-il y avoir un changement conceptuel non souhaitable ?

Cette question est posée pour considérer l'éventualité où l'apprenant avait obtenu des réponses justes au pré-test, mais malheureusement à la suite de l'expérience d'une valence négative durant la séance de jeu, obtient des réponses fausses au post-test. Il serait alors question de changement conceptuel non souhaitable ou de dégradation de l'apprentissage dans ce contexte où l'apprenant pourrait être aux prises avec des pensées intrusives d'évaluation de ses propres compétences, de jugements face à lui-même et

d'inquiétudes reliées à une mauvaise performance (Hinze et Rapp, 2014). Considérant l'impact cognitif possible d'une activation élevée avec valence négative, l'hypothèse suivante est émise :

H2 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est négative, des changements conceptuels non souhaitables sont également notés.

2.6.1.2 Activation psychophysiologique élevée et valence positive

Dans le cas des émotions positives en contexte scolaire, Pekrun *et al.* (2023) proposent le plaisir, l'espoir et la fierté comme émotions possédant une activation psychophysiologique élevée. Pour Nadelson *et al.* (2018) et Gill (2013), les émotions positives seraient associées à la perception de l'apprenant de son conflit cognitif comme un défi plutôt qu'une menace. Son intention est mobilisée, possible par l'activation psychophysiologique de son système, et le changement conceptuel serait alors possible. L'hypothèse suivante émerge de ces quelques éléments théoriques :
H3 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est positive, le changement conceptuel est favorisé.

Il s'agit de la seule combinaison entre l'activation et la valence qui permettrait un changement conceptuel souhaitable. En comparant les réponses au pré-test et au post-test, l'apprenant aurait des réponses fausses au départ et à la suite d'un changement conceptuel, aurait des réponses justes au post-test.
Une deuxième hypothèse est également soulevée pour considérer le cas où l'apprenant est heureux de démontrer ses connaissances acquises.

H4 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est positive, le changement conceptuel a déjà eu lieu et est maintenu.

À ce moment, les résultats seraient exacts au pré-test et au post-test pour la notion concernée. Le participant n'avait pas de notion erronée à corriger, il maitrise les notions de physique demandées et retire un plaisir à démontrer ses compétences malgré une activation élevée qui le maintenant en alerte.

2.6.2 Activation psychophysiologique faible

Une activation psychophysiologique faible est enregistrée lorsque le corps n'est pas sous l'effet de la surprise ou en état d'alerte. À ce moment, les prédictions de la hiérarchie supérieure ne sont pas en conflit avec les signaux ascendants provenant de l'environnement, le système n'a pas besoin de mobiliser son

attention ou de se préparer à l'action (Clark, 2013). Les signaux sensoriels sont prévisibles et la hiérarchie supérieure est en harmonie avec sa représentation interne du monde (Smith *et al.*, 2020). Pekrun *et al.* (2023) parlent alors d'arrêt de l'action (désactivation) pouvant être attribué notamment au soulagement face à la réussite d'un examen, à l'ennui ou au désespoir face au travail à accomplir. Pour ces auteurs, la désactivation est associée à un mécanisme permettant de se retirer et de se désengager de l'action.

Le changement conceptuel est un cadre théorique associé à une certaine activation psychophysiologique élevée autant pour relever les défis de l'apprentissage que pour prendre la fuite face à la perception d'une menace des croyances acquises. En combinant les travaux de Pekrun *et al.* (2023) dans les prochaines sections avec les cadres théoriques du changement conceptuel et du traitement prédictif, il sera possible également de formuler certaines questions et hypothèses vis-à-vis les situations où l'apprenant possède une faible activation.

2.6.2.1 Activation psychophysiologique faible et valence négative :

Lorsqu'il n'y a pas de surprise dans la notion présentée et que la valence est négative, Pekrun *et al.* (2023) ont identifié l'ennui, le désespoir et la déception comme émotions académiques possible. L'ennui est décrit dans leurs travaux comme étant une émotion ressentie dans deux cas différents. En premier lieu, l'ennui est possible lorsque l'apprenant a la perception qu'il n'a pas les capacités pour agir de façon compétente face à un défi trop difficile (overchallenge). Ensuite, l'ennui peut survenir également lorsque la tâche demandée est trop facile, ce qui prive également l'apprenant d'un sentiment de compétence (underchallenge).

En considérant que l'apprentissage ne peut avoir lieu sans une forme d'activation psychophysiologique, ces considérations mènent à énoncer plusieurs hypothèses.

H5 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative ne permet pas de changement conceptuel.

L'apprenant aux prises avec l'ennui, la déception ou le désespoir serait alors incapable de se mobiliser pour apprendre, ces émotions agissant comme un frein pour apprentissage. Si l'apprenant est désengagé de son processus d'apprentissage, les réponses au pré-test sont erronées et restent fausses au post-test.

H6 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative indique que le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu.

Cette hypothèse fait référence à l'ennui spécifiquement vécu par le participant dans le cas où la notion est déjà apprise et maitrisée dans le jeu. Les réponses au pré-test sont réussies et elles sont toujours réussies au post-test, mais le participant ne retire aucun plaisir de cet exercice (underchallenge).

Il est également possible que face à un certain désespoir accompagné d'un désengagement de l'apprentissage à la suite d'échecs répétés pour réussir un tableau de Mécanika, un changement conceptuel non désiré puisse avoir lieu.

H7 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative est un indicateur d'une dégradation du changement conceptuel.

Le changement conceptuel non désiré est observé lorsque le participant obtient de bonnes réponses au pré-test mais obtient des réponses erronées au post-test.

2.6.2.2 Activation psychophysiologique faible avec valence positive :

Selon Barrett (2017), les émotions sont les messages d'erreurs des signaux intéroceptifs, proprioceptifs et extéroceptifs. Avec une valence positive et une faible activation, il n'y a pas d'action à entreprendre pour conserver l'allostasie, car tout va bien. Le processus de prédiction-action donnant lieu à la réduction des incertitudes dans l'environnement permet d'inférer les bonnes actions. Les actions sont appropriées, il n'y a pas de surprise ni de conflit et par conséquent il n'y a pas d'apprentissage selon Dehaene (2018) puisqu'il n'y a pas d'erreur de prédiction. Les émotions académiques associées à cette combinaison dans le modèle Pekrun *et al.* (2023) sont le soulagement, la détente et l'assurance. Dans le cadre du jeu, ceci pourrait se traduire par le participant qui réussit les tableaux facilement et qui ne reçoit pas de réelle surprise ou de menace. Ses actions lui rapportent le succès des tâches demandées et permettent de faire correspondre le tableau de Mécanika à ses prédictions. Ces considérations permettent d'émettre l'hypothèse suivante :

H8 : La combinaison de l'activation faible avec une valence positive est enregistrée lorsque le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu.

Contrairement à la section précédente, faible activation combinée avec valence négative, il n'est pas question d'ennui ici, mais d'une forme d'appréciation de l'activité d'apprentissage liée à des émotions positives. Au niveau de la comparaison des questionnaires, il s'agit de la réussite des questions au pré-test ainsi qu'au post-test. Il n'y a pas eu de changement conceptuel puisqu'il n'y a pas de conflit et la prédiction des actions à prendre est juste.

En guise de résumé et pour préparer le lecteur à la lecture du chapitre suivant, voici un tableau récapitulatif des hypothèses en fonction du modèle circomplexe des émotions. Le résultat des questionnaires pour chacun des concepts des lois newtoniennes présentées se voit attribuer soit le code E, synonyme d'une réponse erronée, soit le code S signifiant un succès pour une bonne réponse. Il est alors possible d'exprimer nos hypothèses en termes de transitions entre les réponses observées au pré-test et celles observées au post-test. Par exemple, la transition EversE signifie que le participant n'a pas obtenu la bonne réponse au pré-test ni au post-test, ce qui signifie qu'il n'y a pas eu de changement conceptuel.

Tableau 2.2 Tableau récapitulatif des hypothèses en fonction du modèle circomplexe

	Activation	
Valence	Élevée	Faible
Négatif	EversE (H1) SversE (H2)	EversE (H5) SversS (H6) SversE (H7)
Positif	EversS (H3) SversS (H4)	SversS (H8)

CHAPITRE 3
MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente les différents éléments méthodologiques. La présentation de l'échantillon issu d'une autre étude est d'abord détaillée pour ensuite préciser les instruments de mesure utilisés, soit les questionnaires pré-test et post-test ainsi que les équipements psychophysiologiques disponibles au Neurolab (UQAM). Ensuite, le devis de recherche propose une description du jeu Mécanika ainsi que le déroulement de la séance de jeu. Le chapitre se termine par le détail de la préparation des données suivi du plan d'analyse.

3.1 Échantillon

3.1.1 Présentation générale des données disponibles

Cette étude utilise des données issues d'une collecte faite dans le cadre d'une autre étude s'étant déroulée au Neurolab (UQAM) sous la direction de Julien Mercier, directeur également de ce mémoire. Il s'agit donc d'analyses secondaires issues des projets antérieurs de M. Mercier. Le Neurolab (UQAM) est doté d'équipements psychophysiologiques à la fine pointe de la technologie pour effectuer les collectes de données et procéder ensuite à leur analyse. Ces équipements sophistiqués permettent aux chercheurs d'étudier la cognition et l'affectivité en lien avec l'apprentissage sur de petites échelles de temps en secondes et en millisecondes.

3.1.2 Sélection des participants

L'échantillon est composé de 82 étudiants volontaires rémunérés (60 $) et recrutés dans différentes disciplines de sciences humaines à l'Université du Québec à Montréal. Les étudiants qui ont suivi des cours de physique dans leur cursus scolaire après le secondaire ne furent pas sélectionnés, car l'objectif est de sélectionner des participants ayant peu de formation sur le sujet afin de leur offrir un contexte pour l'apprentissage de nouvelles connaissances. De plus, les étudiants ayant des problèmes de peau ou des problèmes cardiaques n'ont pas été sélectionnés pour éviter tout conflit avec l'équipement psychophysiologique. L'échantillon final, à la suite de l'élimination des données de 8 participants en raison d'une mauvaise qualité, est composé de 43 (58,10 %) femmes et 31 hommes (41,89 %), dont la moyenne d'âge est de 25,7 ans.

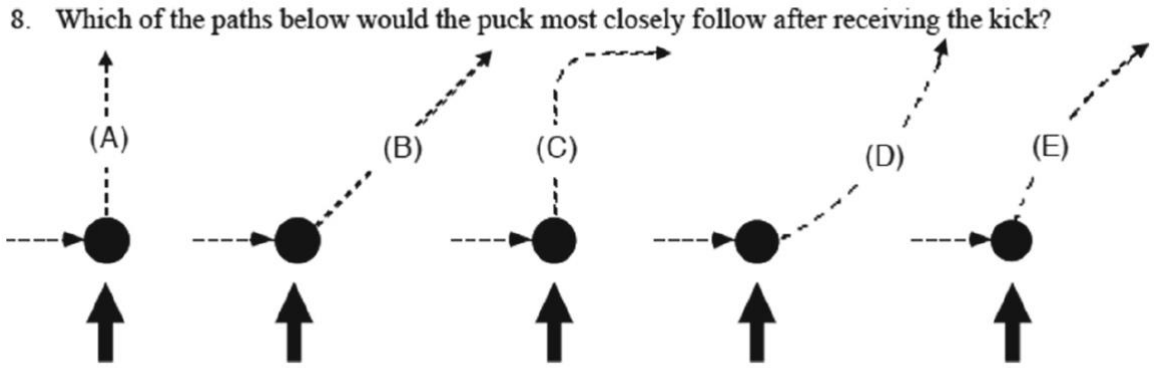
3.2 Instruments de mesure

3.2.1 Force Concept Inventory

Le questionnaire « The Force Concept Inventory » (FCI) développé par Hestenes *et al.* (1992) est largement utilisé pour déterminer les connaissances des étudiants relativement aux lois newtoniennes en physique (Mercier *et al.*, 2020 b). Ce questionnaire fut conçu pour mesurer l'apprentissage des notions de physique mécanique portant sur les trois lois de Newton ainsi que sur les concepts des forces présentes lors du déplacement d'un objet. Plusieurs chercheurs se sont également penchés pour évaluer la validité et la fidélité du FCI depuis sa création par Hestenes et son équipe en 1992. Récemment, les travaux de Murshed (2020) examinent la fidélité interne du FCI en utilisant le modèle de Rasch (Rasch Measurment Model) permettant une analyse statistique approfondie au regard des participants et des items évalués par le test du FCI. Les résultats de l'étude de Murshed (2020) montrent que le FCI possède une cohérence interne forte et permet de mesurer le niveau de compréhension conceptuelle des lois de Newton chez les participants tout en prenant en compte leurs capacités individuelles à répondre au questionnaire. Les conclusions de Murshed (2020) vont dans le même sens que des études antérieures qui laissent croire que le FCI a fait ses preuves dans la communauté scientifique et qu'il est un outil de mesure fiable pour évaluer les changements conceptuels d'apprenants à l'aide du jeu sérieux Mécanika (Boucher-Genesse *et al.*, 2012).

Une version française du FCI disponible pour la communauté scientifique fut utilisée au pré-test et post-test afin d'évaluer les connaissances préalables des participants en physique mécanique ainsi que les gains en apprentissage à la suite du jeu. Le questionnaire du FCI est composé de 30 questions à choix multiple où les possibilités de réponses reflètent le concept scientifique approprié, une fausse idée documentée associée au concept présenté ou d'autres réponses fausses qui ne sont pas reliées aux idées erronées documentées. Il n'y a aucun calcul mathématique à faire pour trouver les réponses dans le test FCI. Le participant doit avoir compris les concepts scientifiques de la physique mécanique pour obtenir une bonne réponse.

Figure 3.1 Exemple de question du FCI



Source : Mercier, J., Whissell-Turner, K., Paradis, A., Avaca, I. L., Riopel, M. & Bédard, M. (2020b). Do Individual Differences Modulate the Effect of Agency on Learning Outcomes with a Serious Game? Dans Zaphiris, P., & Ioannou, A. (2020), *Learning and Collaboration Technologies. Human and Technology Ecosystems* (vol. 12206, p. 254-266). Springer International Publishing, p.8

La comparaison des réponses au pré-test et au post-test expose les quatre scénarios suivants pour l'analyse du changement conceptuel :

- Le participant obtient une mauvaise réponse au pré-test et obtient une bonne réponse au post-test (changement conceptuel favorable).
- Le participant obtient une mauvaise réponse au pré-test et obtient à nouveau une mauvaise réponse au post-test (absence de changement conceptuel).
- Le participant obtient une bonne réponse au pré-test et obtient à nouveau la bonne réponse au post-test (maintien du changement conceptuel).
- Le participant obtient une bonne réponse au pré-test et obtient une mauvaise réponse au post-test (dégradation du changement conceptuel).

Ces quatre transitions seront mises en lien avec le modèle circomplexe des émotions afin de permettre d'identifier les composantes d'activation et de valence liées à ces différents scénarios.

3.2.2 Outils de collecte des données psychophysiologiques

L'apprentissage est un processus dynamique et les instruments de mesure du Neurolab (UQAM) permettent de colliger les observations du comportement des participants et de leurs mesures psychophysiologiques sur des échelles de temps différentes, mais qu'il est possible de superposer.

L'utilisation de l'électroencéphalogramme (EEG) permet l'enregistrement de l'activité électrique associée à l'activité neuronale, notamment en lien avec des mécanismes cognitifs et affectifs de l'apprentissage. Les bonnets choisis comportent 64 électrodes et les signaux de l'EEG sont enregistrés avec un système BrainAmp d'électrodes actives. Des patrons électriques d'activation cérébrale pendant l'exécution d'une tâche sont utilisés pour calculer l'index de la charge cognitive du participant ainsi que celui de l'engagement cognitif relié à l'identification des informations pertinentes. Le calcul de l'asymétrie frontale (FAA) de la puissance des ondes alpha permet l'identification et la mesure de la manifestation du « combat-fuite » (Davidson, 2004). Les informations tirées de l'EEG dans cette étude permettent d'identifier la valence émotionnelle (positive, négative, neutre) à chaque instant de son processus d'apprentissage. Il ne s'agit pas d'identifier une émotion précise qui nécessite l'apport de l'intelligence artificielle avec leurs bases de données de signaux électriques volumineuses.

L'activation du système psychophysiologique est possible en détectant les variations dans les propriétés de l'épiderme à l'aide de la conductance électrodermale. La microsudation produite par les glandes eccrines, à la suite de la détection d'une menace dans l'environnement, est captée par deux électrodes disposées sur les phalanges de l'index et majeur de la main gauche. La conductance électrodermale varie en fonction des changements de la résistance électrique à la surface de la peau qui est calculée à l'aide de la loi d'Ohm. Un courant constant de 0,5 volt est généré par l'équipement couplé aux électrodes installées à la surface de la peau du participant dans la paume de la main. L'enregistrement des variations de la conductance électrodermale permet de distinguer le degré d'activation psychophysiologique du participant à tout moment dans l'expérience.

La combinaison de ces différentes technologies offertes au Neurolab permet d'étudier le fonctionnement psychophysiologique des émotions pour mieux saisir leur impact dans le processus d'apprentissage.

3.3 Devis de recherche

Le devis de recherche utilisé est de type expérimental avec deux groupes (joueurs et témoins) avec prétest-post-test. Les participants dans la recherche initiale sont donc en dyades. La comparaison des résultats du groupe joueurs et du groupe témoins fait l'objet des buts de la recherche initiale. Initialement, pour les fins de ce projet, il avait été décidé d'analyser seulement les données concernant le groupe joueurs. Cependant, à la suite de l'analyse des données (présentée ultérieurement), les résultats montrent que l'effet d'interaction entre le type de participant, joueurs ou témoins est non significatif. Bien que les

témoins ne soient pas dans l'action directement, ils font preuve de variations affectives et de changement conceptuel par le biais de l'observation. Il a été décidé d'inclure l'analyse des données des témoins pour créer un échantillon plus volumineux et augmenter ainsi la force statistique des résultats.

3.3.1 Description du jeu Mécanika

Mécanika est un jeu sérieux développé par Boucher-Genesse *et al.* (2012). Ce jeu présente 58 conceptions erronées identifiées par le FCI au sujet des lois de Newton en physique mécanique. Les 50 tableaux du jeu proposent au joueur de déplacer des objets suivant une trajectoire déterminée alors que différentes forces sont présentes. Chacun des tableaux est conçu pour présenter et travailler au moins une conception erronée proposée par le FCI afin d'apprendre les concepts scientifiques appropriés. Mécanika a été conçu avec des critères essentiels permettant l'apprentissage. Dans un premier temps, l'objectif du jeu est relié au contenu d'apprentissage proposé par le Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (MELS), pour les notions de physiques mécaniques enseignées à la cinquième année du secondaire. Ensuite, la complexité du jeu permet aux participants de faire face à des défis de taille et encourage la réflexion en évitant des scénarios trop simples possibles à résoudre par réflexe. Une progression graduelle est également utilisée afin d'apprendre à manipuler les différentes forces (centripète, vent, gravité, etc.) pour ensuite les combiner. Finalement, les variables existantes dans les lois newtoniennes en physique (position, vitesse, accélération) sont bien représentées dans le jeu de façon dynamique (Boucher-Genesse *et al.*, 2012).

3.3.2 Déroulement de la séance de jeu

Après avoir rempli le questionnaire au pré-test, les participants, joueurs et témoins sont installés et reliés aux équipements de mesures psychophysiologiques. Dans un premier temps, les participants joueurs sont invités à essayer les différentes commandes et déplacements dans le but de se familiariser avec le jeu. Même si la séance n'est pas officiellement démarrée, les équipements de mesures enregistrent tout de même les informations psychophysiologiques de tous les participants à des fins de normalisation des données qui seront exposées dans la prochaine section. Enfin, après une courte familiarisation de Mécanika, les participants sont prêts et commencent officiellement la séance de jeu dont la durée est de deux heures.

Pour chacun des tableaux, le joueur doit choisir les bonnes forces à appliquer, leurs sources et leurs positionnements appropriés pour faire circuler un objet d'un point A au point B afin de réussir le tableau et accéder au suivant. Lorsque le participant n'arrive pas à appliquer la bonne stratégie de déplacement

pour l'objet en mouvement, celui-ci doit recommencer et tenter autre chose. L'appropriation des nouvelles conceptions scientifiques qui sont présentées au participant est nécessaire afin de lui permettre d'avancer d'un tableau à l'autre. Cependant, si au bout de 20 minutes de jeu le participant n'a toujours pas trouvé la solution, le jeu lui permet de passer au tableau suivant afin de poursuivre sa progression. Lorsque les deux heures sont écoulées, les assistants de recherche rejoignent le participant afin de procéder au retirement des équipements. Selon Mercier *et al.* (2020) l'abandon d'un tableau pour passer au suivant se produit en moyenne 4.3 % sur le total de tableaux accomplis. En moyenne, pour une séance de jeu de deux heures, les participants réussissent à terminer 29 tableaux du jeu.

3.4 Préparation des données

La collecte de donnée fut effectuée dans le cadre d'un projet plus large ayant eu lieu au Neurolab, ce qui a pour conséquence de fournir une base de données déjà prête à l'analyse. Voici un résumé de la procédure utilisée pour la préparation des données telle que présentée par Mercier *et al.* (2020) dans leurs différents articles.

Dans un premier temps, les réponses des questionnaires FCI au pré-test et au post-test furent codées pour représenter les réponses possibles (E – Erreur, indiquant une mauvaise réponse ; S – Succès, indiquant une bonne réponse). Il est alors possible de considérer les quatre transitions suivantes entre les réponses au pré-test et au post-test : EversE, EversS, SversS et SversE. Ces transitions sont les variables associées au changement conceptuel qui seront mises en relation avec le modèle circomplexe des émotions. Chacune des transitions possibles est alors identifiée et dénombrée pour l'ensemble des questions du FCI, et ce pour tous les participants de l'étude. Différents tests statistiques utilisant la procédure SAS CATMOD sont ensuite utilisés (SAS Institute 2013, dans Mercier *et al.*, 2020 b) afin de permettre l'adaptation des modèles de régression linéaire et logarithmique aux fréquences catégorielles E et S pour fin d'analyse.

Afin de mesurer la valence émotionnelle, une décontamination du signal EEG est nécessaire afin d'isoler uniquement l'information relative à la FAA (Davidson, 2004). Pour ce faire, seulement l'enregistrement des doubles mastoïdes TP9 et TP10 fut tiré de l'EEG. À cette fin, uniquement les signaux des électrodes F3 et F4 ont été conservés. La bande Alpha (8-13 Hz) fut la seule à être exportée afin d'être traitée par la Transformation de Fourier Rapide (FFT) afin de permettre la transformation des données continues de son domaine temporel vers son expression en données discrètes sur un domaine fréquentiel. La valence

émotionnelle est ensuite calculée par soustraction de la mesure Alpha provenant des électrodes F3 et de F4 pour fournir un point de donnée par seconde.

En ce qui concerne la mesure de l'activation psychophysiologique, le traitement des données est effectué pour chacun des participants. En effet, les variations de l'activité électrodermale enregistrées sont normalisées de façon individuelle en utilisant un intervalle de temps d'une durée de deux minutes tirées des données enregistrées précédent le début de la séance de jeu Mécanika. Cet intervalle avant la période d'apprentissage permet de calculer l'activation normalisée des participants qui est ensuite comparée au degré d'activation en cours de jeu. La variation totale de l'activation durant ces deux minutes est compilée en utilisant l'aire sous la courbe produite par la mesure de conductance électrodermale (en valeur absolue) en fonction du temps. Ainsi un point de donnée par seconde est généré par Hz ce qui permet de détecter les variations importantes de l'activation des participants pendant la séance de jeu.

Pour finir, la synchronisation des données en point par seconde de la conductance électrodermale avec celles de la FAA (en point par seconde également) permet d'observer l'activation et la valence en même temps pour chacun des participants tout au long de l'expérience. Les données concernant l'affectivité du participant prennent donc la forme de séries temporelles.

3.5 Plan d'analyse des données

3.5.1 Traitement des données

Les séries temporelles associées à l'affect sont segmentées en épisodes, sur la base du temps requis pour réaliser un tableau dans Mécanika et qui s'avère variable selon les participants. Par la suite, une transformation supplémentaire est nécessaire pour la création de vecteurs de l'affect issus des variables catégorielles provenant des données en point par seconde de l'activation et de la valence prises simultanément. Ceci est nécessaire afin d'associer les données de l'affect aux différents quadrants du modèle circomplexe. Grâce à l'utilisation d'un vecteur, qui possède une position dans l'un des quadrants ainsi qu'une longueur représentant son intensité, il est possible d'étudier les différentes combinaisons d'activation et de valence. Ainsi les points par seconde des signaux de l'activation et la valence sont transformés en autant de vecteurs issus de l'origine qui sont maintenant associés au modèle circomplexe des émotions.

3.5.2 Analyses quantitatives

Le cadre théorique de cette recherche a permis de poser un total de huit hypothèses concernant le changement conceptuel en fonction des différentes combinaisons possibles entre l'activation et de valence émotionnelle (cf. Tableau 3.1).

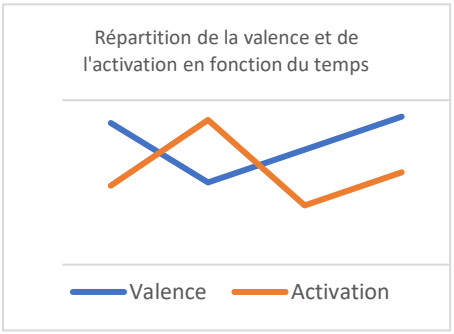
Tableau 3.1 Rappel des hypothèses en fonction du modèle circomplexe

	Activation	
Valence	Élevée	Faible
Négatif	EversE (H1) SversE (H2)	EversE (H5) SversS (H6) SversE (H7)
Positif	EversS (H3) SversS (H4)	SversS (H8)

Au total, quatre ensembles de tests différents seront exécutés pour considérer les quatre quadrants du modèle circomplexe. Pour les besoins d'analyse, la variable indépendante fut associée au changement conceptuel. Les différentes transitions associées au changement conceptuel (EversE, EversS, SversE, puis SversS) définissent les quatre catégories associées à la variable indépendante. Ensuite la relation entre l'intensité des vecteurs de l'affect, pour un quadrant donné, est étudiée en fonction de chacune des transitions. Ceci explique la nécessité des quatre tests différents, un pour chaque quadrant, qui permet d'étudier l'intensité des vecteurs en fonction des transitions afin de confirmer ou infirmer les hypothèses de cette recherche structurées en fonction du modèle circomplexe des émotions.

Puisque les variables indépendantes, les transitions du changement conceptuel, sont catégorielles, l'approche loglinéaire sera utilisée. De plus, un modèle hiérarchique est nécessaire puisque les données sont nichées (un participant fournit 30 transitions liées au changement conceptuel et réalise de multiples tableaux dans le jeu). La figure suivante permet de représenter visuellement le processus d'analyse complexe afin de clarifier la procédure.

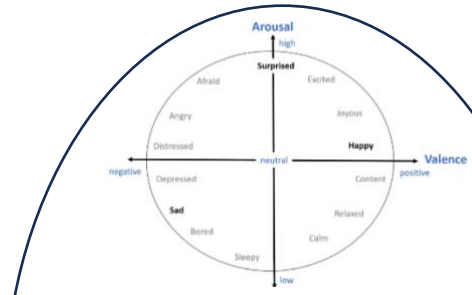
Figure 3.2 Visualisation du processus d'analyse



Question du FCI pour 1 joueur	Pré-test	Post-test
#1	S	E
#2	S	S
#3	E	S
#4	E	E
#5	E	S
#6	S	S

Correspondance

Transitions



Russel (1980)

Ensemble de tests

Analyses

Transitions
SversE
SversS
EversS
EversE
EversS
SversS

L'analyse des données est effectuée en fonction des variables catégorielles représentant les transitions pour confirmer ou infirmer les hypothèses qui leur sont associées. Les quatre scénarios de transitions possibles ainsi que les hypothèses sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 3.2 Transitions et hypothèses associées

Transitions	Hypothèses
EversE	H1 : Lorsque l'activation psychophysiologique est élevée et que la valence est négative, le participant apprend moins efficacement (superficiellement) ou pas du tout. Il n'y a pas de changement conceptuel. OU H5 : La combinaison d'une activation psychophysiologique faible avec valence négative ne permet pas de changement conceptuel.
SversE	H2 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est négative, des changements conceptuels non souhaitables sont également notés. OU H7 : La combinaison d'une activation psychophysiologique faible avec valence négative est également un indicateur d'une dégradation du changement conceptuel.
SversS	H4 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est positive, le changement conceptuel a déjà eu lieu et est maintenu. OU H6 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative indique que le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu. OU H8 : La combinaison de l'activation faible avec une valence positive est enregistrée lorsque le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu.
EversS	H3 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est positive, le changement conceptuel est favorisé.

Ceci conclut les détails essentiels de la méthodologie afin de poursuivre avec la présentation des résultats dans le chapitre suivant. Dans un souci de clarification du processus d'analyse et des variables utilisées, le prochain chapitre débute en présentant au lecteur certains détails jugés pertinents à une bonne compréhension des résultats et de leur interprétation en complémentarité avec l'aspect plus technique abordé dans la méthodologie.

CHAPITRE 4
RÉSULTATS

Ce chapitre comporte cinq sous-sections afin de présenter les résultats associés à la question générale de recherche ainsi que les huit hypothèses présentées plus tôt (cf. Section 2.5) en fonction du changement conceptuel possible. Il semble toutefois pertinent de résumer quelques éléments de la méthode utilisée ainsi que de définir les variables traitées dans les résultats.

Globalement, les données sont préparées afin de permettre une association entre une question du FCI (et donc une transition représentant s'il y a changement conceptuel ou pas) et l'affect lors de l'apprentissage des concepts de physique qui permet au participant de répondre à une question. Lors du traitement des données, les mesures associées à l'activation et la valence ont été combinées à chaque seconde afin de permettre une association de l'affect du participant à l'un des quatre quadrants du modèle circomplexe des émotions.

Ce couplage entre l'activation et la valence est représenté par un vecteur issu de l'origine du modèle circomplexe. Ce vecteur de l'affect possède une position dans l'un des quatre quadrants du plan cartésien ainsi qu'une longueur. Cette longueur représente l'intensité affective au regard de la valence et de l'activation. Pour un intervalle de temps donné, le participant de l'étude observé génère des signaux psychophysiologiques dans différents quadrants. L'affect du participant peut également changer d'intensité dans le même quadrant ou générer un vecteur dans un quadrant différent d'une seconde à l'autre. Son affectivité est rarement stable, même pour un petit intervalle de temps donné.

D'autre part, le changement conceptuel est évalué en comparant les réponses du questionnaire FCI au pré-test et au post-test. Il n'y a que deux réponses possibles, succès ou échec. Il y a donc quatre transitions possibles entre les réponses comparées au pré-test et au post-test (EversE, EversS, SversE et SversS). Ces quatre transitions seront mises en lien avec les quatre quadrants du modèle circomplexe des émotions afin de permettre d'identifier les composantes d'activation et de valence liées à différents scénarios d'apprentissage.

Le questionnaire du FCI comporte 30 questions au total. Pour chacune de ces questions, la moyenne des vecteurs de l'affect du participant a été calculée. Ceci engendre cinq variables d'intensité affective étudiées en lien avec le changement conceptuel :

1) Intensité affective moyenne : Pour une question donnée du FCI, la variable Intensité affective moyenne représente l'intensité moyenne de l'affect, tous quadrants confondus.

2) Intensité affective moyenne QÉ+ : Pour une question donnée du FCI, la variable Intensité affective moyenne QÉ+ représente l'intensité moyenne de l'affect uniquement pour le quadrant É+ (activation élevée et valence positive).

3) Intensité affective moyenne QÉ- : Pour une question donnée du FCI, la variable Intensité affective moyenne QÉ- représente l'intensité moyenne de l'affect uniquement pour le quadrant É- (activation élevée et valence négative).

4) Intensité affective moyenne QF- : Pour une question donnée du FCI, la variable Intensité affective moyenne QF- représente l'intensité moyenne de l'affect uniquement pour le quadrant F- (activation faible et valence négative)

5) Intensité affective moyenne QF+ : Pour une question donnée du FCI, la variable Intensité affective moyenne QF+ représente l'intensité moyenne de l'affect uniquement pour le quadrant F+ (activation faible et valence positive)

Pour les besoins d'analyse, la variable indépendante fut associée au changement conceptuel. Celle-ci possède 4 modalités représentant les transitions possibles du changement conceptuel entre le pré-test post et post-test en considérant le succès (S) ou l'erreur (E) pour une question donnée (EversE, EversS, SverS et SversE). Il est à noter que le traitement des données ainsi que l'approche statistiques utilisée en raison des données nichées ont généré plusieurs compromis qui seront discutés ultérieurement dans les limites de cette étude.

4.1 L'affectivité et le changement conceptuel

À partir du cadre théorique proposé de cette recherche, la question générale suivante fut formulée :

Q : Est-ce que le changement conceptuel concernant la physique mécanique (lois newtoniennes) dans le cadre du jeu Mécanika est lié à l'affectivité ?

L'étude de l'intensité affective moyenne permet de vérifier s'il y a une relation entre l'intensité du vecteur dans le modèle circomplexe des émotions et le changement conceptuel représenté par les quatre transitions notées entre le résultat du pré-test et post-test (EversE, EversS, SverS et SversE). Les données de l'intensité affective moyenne, pour chacun des participants et pour chacune des questions du FCI, ont été analysées à l'aide d'un test d'analyse de régression à effets mixtes en raison des données nichées. Un test de normalité a été effectué sur la distribution des moyennes de l'intensité de l'affect et les conditions pour l'analyse de régression sont respectées.

L'analyse des différences de l'intensité affective moyenne indique la présence d'une relation entre les transitions du changement conceptuel et l'intensité affective moyenne représentant l'activation et la valence considérée simultanément ($F_{(3,\ 1950)}$ = 14,243, p < ,05). Il est à noter que l'utilisation du mot « relation » n'exprime en aucun cas un lien de nature causale entre le changement conceptuel et les variables étudiées en lien avec le modèle circomplexe des émotions.

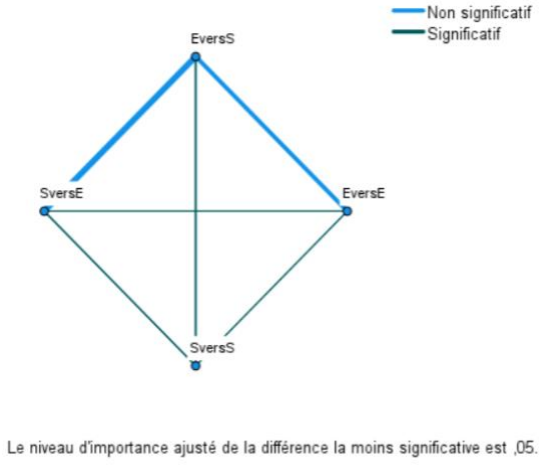
Bien que les résultats indiquent qu'il y a une relation entre les transitions associées au changement conceptuel et l'intensité affective moyenne, il est nécessaire de déterminer si certaines transitions en particulier ont un rôle à jouer. Une analyse post-hoc des contrastes permet de comparer de plus près l'interaction de chacune des transitions du changement conceptuel au regard de l'intensité affective moyenne. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.1

Tableau 4.1 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel pour l'intensité affective moyenne

Contrastes par paire	Estimation de contraste	Erreur standard	t	df	Sig. ajus.	95% Intervalle de confiance	
						Inférieur	Supérieur
EversS - EversE	4,550	3,896	1,168	1950	0,243	-3,090	12,191
SversE - EversE	10,217	4,837	2,112	1950	0,035	0,731	19,703
SversE - EversS	5,667	5,873	0,965	1950	0,335	-5,851	17,186
SversS - EversE	22,766	3,562	6,392	1950	0,001	15,780	29,751
SversS - EversS	18,215	4,876	3,736	1950	0,001	8,652	27,778
SversS - SversE	12,548	5,657	2,218	1950	0,027	1,453	23,643

Le niveau d'importance ajusté de la différence la moins significative est 0,05.

Figure 4.1 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel pour l'intensité affective moyenne



Le niveau d'importance ajusté de la différence la moins significative est ,05.

Les résultats de la comparaison par paire indiquent que la transition SversS, est liée à une intensité affective significativement différente de celles des transitions EversE (t_{1950} = 6,392, p < ,05), EversS (t_{1950} = 3,736, p < ,05), ainsi que SversE (t_{1950} = 2,218, p < ,05). La transition SversS est associée à une intensité affective moyenne plus élevée que les 3 autres transitions. Ces observations suggèrent que la transition SversS explique principalement la relation trouvée entre le changement conceptuel et les variations de l'intensité affective (cf. Figure 4.1). L'intensité émotionnelle moyenne est plus élevée lorsque le participant démontre qu'il possède les connaissances scientifiques appropriées au pré-test et qu'il maintient ses connaissances à travers le jeu avec une bonne réponse au post-test.

Il est également noté que la transition SversE, est liée à une intensité affective significativement différente de la transition EversE (t_{1950} = 2,112, p < ,05). Les observations proposent que l'intensité émotionnelle moyenne soit plus élevée lorsqu'il y a un changement conceptuel indésirable que lorsqu'il n'y a pas de changement conceptuel (cf. Tableau 4.1).

Les prochaines sous-sections présentent les résultats en fonction des quadrants du modèle circomplexe des émotions. Chacune des hypothèses associées est nommée puis répétée dans les sous-sections associées pour faciliter la lecture.

Tableau 4.2 Rappel, hypothèses associées à chacun des quadrants du modèle circomplexe

	Activation	
Valence	Élevée	Faible
Négatif	QÉ- : EversE (H1) SversE (H2)	QF- :EversE (H5) SversS (H6) SversE (H7)
Positif	QÉ+ : EversS (H3) SversS (H4)	QF+ : SversS (H8)

4.2 Quadrant de l'activation élevée et valence négative (QÉ-)

Deux hypothèses sont associées à cette combinaison dans ce quadrant du modèle circomplexe :

H1 : Lorsque l'activation psychophysiologique est élevée et que la valence est négative, le participant apprend moins efficacement (superficiellement) ou pas du tout. Il n'y a pas de changement conceptuel.
H2 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est négative, des changements conceptuels non souhaitables sont également notés.

Les résultats généraux associés à QÉ- sont d'abord énoncés pour ensuite compléter l'analyse au regard des hypothèses. L'analyse des différences de variances pour l'intensité affective moyenne QÉ- indique qu'elles sont reliées significativement aux transitions du changement conceptuel ($F_{(3, 1229)}$ = 4,378, p < ,05). Il y a donc une relation entre les transitions du changement conceptuel et l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est élevée et la valence est négative. Le tableau 4.3 présente les résultats de l'analyse

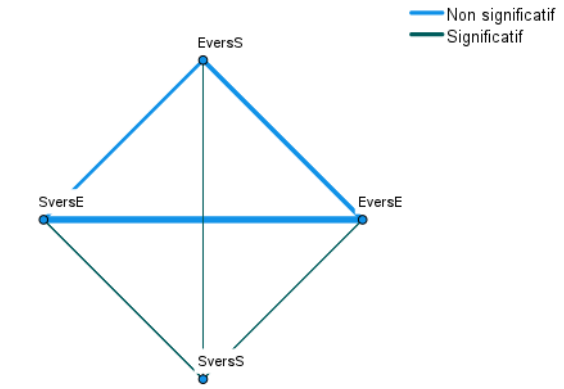
post-hoc des contrastes qui permet de comparer de plus près l'interaction de chacune des transitions du changement conceptuel au regard de l'intensité affective moyenne QÉ-.

Tableau 4.3 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel pour l'intensité affective moyenne QÉ-

Contrastes par paire	Estimation de contraste	Erreur standard	t	df	Sig. ajus.	95% Intervalle de confiance	
						Inférieur	Supérieur
EversE - EversS	0,367	4,893	0,075	1229	0,940	-9,233	9,966
SversE - EversE	0,351	6,097	0,058	1229	0,954	-11,612	12,313
SversE - EversS	0,717	7,358	0,097	1229	0,922	-13,719	15,154
SversS - EversE	16,528	4,654	3,552	1229	0,001	7,398	25,658
SversS - EversS	16,895	6,191	2,729	1229	0,006	4,748	29,042
SversS - SversE	16,178	7,208	2,244	1229	0,025	2,035	30,320

Le niveau d'importance ajusté de la différence la moins significative est 0,05.

Figure 4.2 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel pour l'intensité affective moyenne QÉ-



Le niveau d'importance ajusté de la différence la moins significative est ,05.

Les résultats du tableau 4.3 indiquent que la transition SversS, est liée à une intensité affective significativement différente de celles des transitions EversE (t_{1229} = 3,552, p < ,05), EversS (t_{1229} = 2,729, p < ,05) et SversE (t_{1229} = 2,244, p < ,05) dans QE-. La transition SversS est associée à une intensité affective moyenne plus élevée que les 3 autres transitions.

4.2.1 H1 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est négative, le participant apprend moins efficacement (superficiellement) ou pas du tout. Il n'y a pas de changement conceptuel.

Le test de comparaison par paire révèle que la transition EversE, associée à aucun changement conceptuel, n'est pas relié significativement différemment à l'intensité affective moyenne QÉ- lorsque comparée aux transitions EversS et SversE (cf. Figure 4.2). L'analyse post-hoc permet plutôt d'observer que c'est la transition SversS qui est reliée significativement différemment avec la variation de l'intensité affective moyenne QÉ-. La transition SversS est reliée à une augmentation de l'intensité affective moyenne QÉ-. Une plus forte intensité affective moyenne d'activation élevée et de valence négative est observée chez le participant lorsqu'il y a un maintien de ses connaissances scientifiques comparativement à l'absence de changement conceptuel. H1 est donc invalidée telle qu'elle fut énoncée, l'absence de changement conceptuel définie par EversE ne peut être mis en relation significativement avec l'augmentation de l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est élevée et la valence négative.

4.2.2 H2 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est négative, des changements conceptuels non souhaitables sont également notés.

Le test de comparaison par paire révèle que la transition SversE, associé à la dégradation du changement conceptuel, n'est pas reliée significativement différemment avec l'intensité affective moyenne QÉ- lorsque comparée aux transitions EversS et EversE (cf. Figure 4.2). L'analyse post-hoc permet plutôt d'observer que c'est la transition SversS qui est reliée significativement différemment avec la variation de l'intensité affective moyenne QÉ-. La transition SversS est reliée à une augmentation de l'intensité affective moyenne QÉ-. Une plus forte intensité affective moyenne d'activation élevée et de valence négative est observée chez le participant lorsqu'il y a un maintien de ses connaissances scientifiques comparativement à une dégradation du changement conceptuel. H2 est donc invalidée, la dégradation du changement conceptuel ne peut être mise en relation significativement avec l'augmentation de l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est élevée et la valence négative.

4.3 Quadrant de l'activation élevée et valence positive (QÉ+)

Deux hypothèses sont associées à ce quadrant du modèle circomplexe :

H3 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est positive, le changement conceptuel est favorisé.

H4 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est positive, le changement conceptuel a déjà eu lieu et est maintenu.

Les résultats généraux associés à QÉ+ sont d'abord énoncés pour ensuite compléter l'analyse au regard des hypothèses. L'analyse des différences de variances pour l'intensité affective moyenne QÉ+ indique qu'elles sont reliées significativement aux transitions du changement conceptuel ($F_{(3, 1229)} = 17{,}027$, $p < {,}05$). Il y a donc une relation entre les transitions du changement conceptuel et l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est élevée et la valence positive.

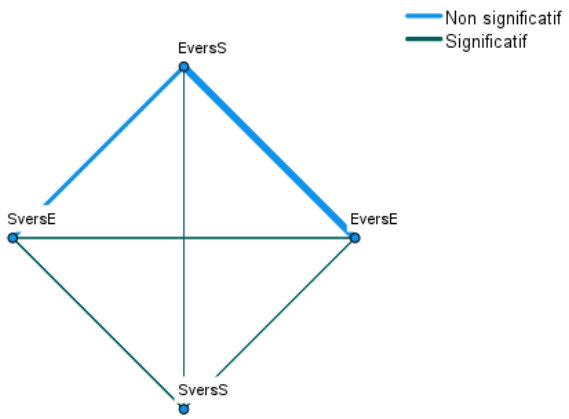
Le tableau 4.4 montre les résultats de l'analyse post-hoc des contrastes qui permet de comparer de plus près l'interaction de chacune des transitions du changement conceptuel au regard de l'intensité affective moyenne QÉ+.

Tableau 4.4 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel de l'intensité affective moyenne QÉ+

						95% Intervalle de confiance	
Contrastes par paire	Estimation de contraste	Erreur standard	t	df	Sig. ajus.	Inférieur	Supérieur
EversS - EversE	3,911	3,946	0,991	1929	0,322	-3,827	11,649
SversE - EversE	11,887	4,906	2,423	1929	0,015	2,264	21,510
SversE - EversS	7,977	5,997	1,330	1929	0,184	-3,785	19,738
SversS - EversE	25,658	3,700	6,935	1929	0,001	18,402	32,914
SversS - EversS	21,747	5,058	4,300	1929	0,001	11,828	31,666
SversS - SversE	13,771	5,838	2,359	1929	0,018	2,321	25,221

Le niveau d'importance ajusté de la différence la moins significative est 0,05.

Figure 4.3 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel de l'intensité affective moyenne QÉ+



Le niveau d'importance ajusté de la différence la moins significative est ,05.

Les résultats du tableau 4.4 montrent que la transition SversS, est liée à une intensité affective significativement différente de celles des transitions EversE (t_{1229} = 6,935, p < ,05), EversS (t_{1229} = 4,300, p < ,05) et SversE (t_{1229} = 2,359, p < ,05) dans QE+. La transition SversS est associée à une intensité affective moyenne plus élevée que les 3 autres transitions. Il est également à noter que la transition SversE, associée à une intensité affective moyenne plus élevée, est reliée significativement différemment comparativement à la transition EversE au regard de l'intensité affective moyenne QÉ+ (t_{1229} = 2,423, p < ,05) (cf. Figure 4.2).

4.3.1 H3 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est positive, le changement conceptuel est favorisé.

Le test de comparaison par paire révèle que la transition EversS, associé au changement conceptuel favorisé, n'est pas reliée significativement différemment avec l'intensité affective moyenne QÉ+ lorsque comparée aux transitions SversE et EversE (cf. Figure 4.7). L'analyse post-hoc permet plutôt d'observer que c'est la transition SversS qui est liée significativement différemment avec la variation de l'intensité affective moyenne QÉ+. La transition SversS est reliée à une augmentation de l'intensité affective moyenne QÉ+. Une plus forte intensité affective moyenne d'activation élevée et de valence positive est observée chez le participant lorsqu'il y a un maintien des connaissances scientifiques comparativement à un changement conceptuel favorable. H3 est donc invalidée, le changement conceptuel favorable ne peut

être relié significativement avec l'augmentation de l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est élevée et la valence positive.

4.3.2 H4 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est positive, le changement conceptuel a déjà eu lieu et est maintenu.

Le test de comparaison par paire révèle que la transition SversS, associé au maintien du changement conceptuel, est reliée différemment avec l'intensité affective moyenne QÉ+ de façon significativement plus élevée, lorsqu'elle est comparée aux autres transitions (cf. Figure 4.3). L'hypothèse H4 est donc validée puisqu'une différence significative de l'intensité affective QÉ+ est observée lorsque la réponse est connue au pré-test ainsi qu'au post-test. Une plus forte intensité affective moyenne d'activation élevée et de valence positive est observée chez le participant lorsqu'il y a maintien du changement conceptuel.

4.4 Quadrant Activation faible et valence négative (QF-)

Trois hypothèses sont associées à cette combinaison dans ce quadrant du modèle circomplexe :

H5 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative ne permet pas de changement conceptuel.
H6 : La combinaison d'une activation psychophysiologique faible avec valence négative indique que le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu.
H7 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative est un indicateur d'une dégradation du changement conceptuel.

Les résultats généraux associés à QF- sont d'abord énoncés pour ensuite compléter l'analyse au regard des hypothèses. L'analyse des différences de variances pour l'intensité affective moyenne QF- indique qu'elles sont reliées significativement aux transitions du changement conceptuel ($F_{(3, 1239)} = 6{,}520$, $p < {,}05$). Il y a donc une relation entre les transitions du changement conceptuel et l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est faible et la valence négative.

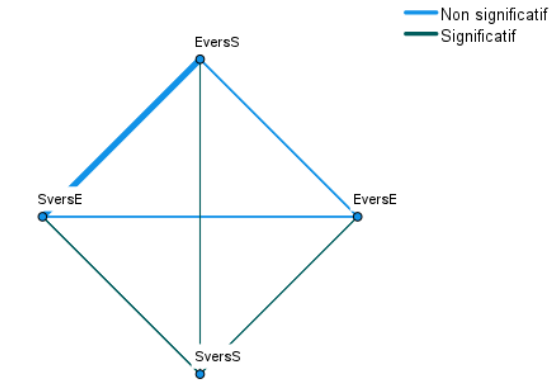
Le tableau 4.5 présente les résultats de l'analyse post-hoc des contrastes qui permet de comparer de plus près l'interaction de chacune des transitions du changement conceptuel au regard de l'intensité affective moyenne QF-.

Tableau 4.5 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel de l'intensité affective moyenne QF-

Contrastes par paire	Estimation de contraste	Erreur standard	t	df	Sig. ajus.	95% Intervalle de confiance	
						Inférieur	Supérieur
EversS - EversE	1,588	4,630	0,343	1239	0,732	-7,494	10,671
SversE - EversE	2,466	6,096	0,404	1239	0,686	-9,494	14,426
SversE - EversS	0,878	7,258	0,121	1239	0,904	-13,362	15,117
SversS - EversE	20,261	4,591	4,413	1239	0,001	11,254	29,268
SversS - EversS	18,672	6,039	3,092	1239	0,002	6,824	30,521
SversS - SversE	17,795	7,240	2,458	1239	0,014	3,592	31,998

Le niveau d'importance ajusté de la différence la moins significative est 0,05.

Figure 4.4 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel de l'intensité affective moyenne QF-



Le niveau d'importance ajusté de la différence la moins significative est ,05.

Le tableau 4.5 montre que la transition SversS, est liée à une intensité affective significativement différente de celles des transitions EversE (t_{1239} = 4,413, p < ,05), EversS (t_{1239} = 3,092, p < ,05) et SversE (t_{1239} = 2,458, p < ,05) dans QF-. La transition SversS est associée à une intensité affective moyenne plus élevée que les 3 autres transitions.

4.4.1 H5 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative ne permet pas de changement conceptuel.

Le test de comparaison par paire révèle que la transition EversE, associée à aucun changement conceptuel, n'est pas reliée significativement différemment avec l'intensité affective moyenne QF- lorsque comparée aux transitions EversS et SversE (cf. Figure 4.4). L'analyse post-hoc permet plutôt d'observer que c'est la transition SversS qui est reliée différemment de façon significativement plus élevée avec la variation de l'intensité affective moyenne QF-. Une plus forte intensité affective moyenne d'activation élevée et de valence négative est observée chez le participant lorsqu'il y a un maintien de ses connaissances scientifiques comparativement à l'absence de changement conceptuel défini par EversE. H5 est donc invalidée telle qu'elle fut énoncée, l'absence de changement conceptuel ne peut être mise en relation significativement avec une intensité affective moyenne plus importante d'activation faible et de valence négative.

4.4.2 H6 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative indique que le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu.

Le test de comparaison par paire révèle que la transition SversS, associé au maintien du changement conceptuel, est reliée différemment de façon significativement plus élevée avec la variation de l'intensité affective moyenne QF- lorsqu'elle est comparée aux autres transitions (cf. Figure 4.4). L'hypothèse H6 est donc validée puisqu'une augmentation significative de l'intensité affective QF- est observée lorsque la réponse est connue au pré-test ainsi qu'au post-test. Une plus forte intensité affective moyenne d'activation faible et de valence faible est observée chez le participant lorsqu'il y a maintien du changement conceptuel comparativement à tous les autres scénarios du changement conceptuel.

4.4.3 H7 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative est un indicateur d'une dégradation du changement conceptuel.

Le test de comparaison par paire montre que la transition SversE, associé à la dégradation du changement conceptuel, n'est pas reliée significativement différemment à l'intensité affective moyenne QF- lorsque comparée aux transitions EversS et EversE (cf. Figure 4.4). L'analyse post-hoc permet plutôt d'observer que c'est la transition SversS qui est reliée différemment, de façon significativement plus élevée, avec la variation de l'intensité affective moyenne QF-. Une plus forte intensité affective moyenne d'activation faible et de valence négative est observée chez le participant lorsqu'il y a un maintien de ses connaissances scientifiques comparativement à une dégradation du changement conceptuel. H7 est donc invalidée, la

dégradation du changement conceptuel ne peut être mise en relation significativement avec l'intensité affective moyenne plus importante lorsque l'activation est faible et la valence négative.

4.5 Quadrant de l'activation faible et valence positive (QF+)

Une hypothèse est associée à cette combinaison dans ce quadrant du modèle circomplexe. Ainsi les résultats sont présentés directement en fonction de cette hypothèse.

4.5.1 H8 : La combinaison de l'activation faible avec une valence positive est enregistrée lorsque le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu.

L'analyse des différences de variances pour l'intensité affective moyenne QF+ indique qu'elles sont reliées significativement aux transitions du changement conceptuel ($F_{(3, 1465)}$ = 8,333, p < ,05). Il y a donc une relation entre les transitions du changement conceptuel et l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est faible et la valence positive.

Le tableau 4.6 présente les résultats de l'analyse post-hoc des contrastes qui permet de comparer l'interaction de chacune des transitions du changement conceptuel au regard de l'intensité affective moyenne QF+.

Tableau 4.6 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel de l'intensité affective moyenne QF+

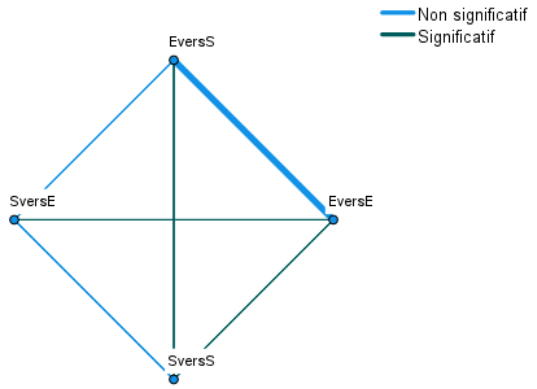
						95% Intervalle de confiance	
Contrastes par paire	Estimation de contraste	Erreur standard	t	df	Sig. ajus.	Inférieur	Supérieur
EversS - EversE	0,776	3,729	0,208	1465	0,835	-6,540	8,091
SversE - EversE	9,968	4,838	2,060	1465	0,040	0,478	19,459
SversE - EversS	9,193	5,876	1,564	1465	0,118	-2,334	20,720
SversS - EversE	17,053	3,638	4,688	1465	0,001	9,917	24,189
SversS - EversS	16,277	4,906	3,318	1465	0,001	6,655	25,900
SversS - SversE	7,085	5,810	1,219	1465	0,223	-4,312	18,481

Le niveau d'importance ajusté de la différence la moins significative est 0,05.

Le tableau 4.6 montre que la transition SversS est liée à une intensité affective significativement différente de celles des transitions EversE (t_{1465} = 4,688, p < ,05) et EversS (t_{1465} = 3,318, p < ,05) dans QF+. La transition SversS est associée à une intensité affective moyenne plus élevée que les 2 autres transitions. Il

est également à noter que la transition SversE est reliée significativement différemment comparativement à la transition EversE au regard de l'intensité affective moyenne QF+ (t_{1465} = 2,060, p < ,05) avec une intensité affective moyenne plus élevée également.

Figure 4.5 Contrastes par paire des transitions du changement conceptuel pour l'intensité affective moyenne QF+



Le niveau d'importance ajusté de la différence la moins significative est ,05.

Le test de comparaison par paire révèle que la transition SversS, représentant le maintien du changement conceptuel n'explique pas à elle seule la relation significative trouvée avec l'augmentation de l'intensité affective moyenne QF+ (cf. Figure 4.5). L'hypothèse H8 est partiellement validée. Une plus forte intensité affective moyenne significative d'activation faible et de valence positive est observée chez le participant lorsqu'il y a maintien du changement conceptuel comparativement à l'absence de changement conceptuel ou au changement conceptuel favorable. En revanche, lorsque le maintien du changement conceptuel est comparé à la dégradation du changement conceptuel, il n'y a pas de différence significative entre les variations de l'intensité affective QF+ observée, ce qui fait en sorte que H8 est invalidée dans ce cas.

Plusieurs résultats ne correspondent pas aux résultats attendus énoncés par les hypothèses et paraissent contradictoires avec le cadre théorique de ce travail. Dans le prochain chapitre, la discussion principale est axée sur l'interprétation de la relation entre l'intensité affective moyenne associée aux quadrants du modèle circomplexe et le scénario où le participant connaissait les réponses au pré-test puis maintient ses bonnes réponses au post-test.

CHAPITRE 5
DISCUSSION

Dans ce chapitre, les résultats obtenus sont confrontés à la problématique initiale et comparés aux résultats de travaux existants ayant permis de poser le cadre théorique de ce travail. L'objectif est de montrer comment les résultats contribuent au développement de nouvelles connaissances, tout en soulignant certains éléments contradictoires de ceux anticipés par les hypothèses.

Tableau 5.1 Rappel des hypothèses et de leur statut de validation

Hypothèses	Statut de validation
H1 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est négative, le participant apprend moins efficacement (superficiellement) ou pas du tout. Il n'y a pas de changement conceptuel.	Invalidée
H2 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est négative, des changements conceptuels non souhaitables sont également notés.	Invalidée
H3 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est positive, le changement conceptuel est favorisé.	Invalidée
H4 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est positive, le changement conceptuel a déjà eu lieu et est maintenu.	Validée
H5 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative ne permet pas de changement conceptuel.	Invalidée
H6 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative indique que le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu.	Validée
H7 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative est un indicateur d'une dégradation du changement conceptuel.	Invalidée
H8 : La combinaison de l'activation faible avec une valence positive est enregistrée lorsque le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu.	Partiellement validée

5.1 La relation entre l'affectivité et le changement conceptuel

L'objectif général de cette recherche est d'apporter de plus amples informations sur la relation entre l'affectivité et l'apprentissage.

Q : Est-ce que le changement conceptuel concernant la physique mécanique (lois newtoniennes) dans le cadre du jeu Mécanika est lié à l'affectivité ?

Les résultats indiquent la présence d'une relation entre le changement conceptuel et l'intensité affective moyenne représentant l'activation et la valence considérée simultanément. Les données observées suggèrent que l'augmentation de l'intensité affective moyenne est en relation avec le scénario où le participant démontre qu'il a déjà intégré les conceptions scientifiques appropriées pour naviguer aisément dans les tableaux de Mécanika avec succès (SversS). De plus, de façon générale, il n'y a pas de différence significative notée en comparant l'intensité affective moyenne des participants ne connaissant pas les bonnes réponses au pré-test. En effet, les résultats suggèrent que parmi ces participants, ceux ayant obtenu les bonnes réponses au post-test (EversS) n'ont pas vécu une intensité affective d'une différence notable avec ceux ayant obtenu une mauvaise réponse au post-test (EversE). Cependant, il y a une possibilité que la transition EversE note un changement conceptuel vers une mauvaise conception scientifique qu'il est impossible de relever avec les outils de mesure de ce projet. Ceci pourrait être une explication de la différence non significative entre l'obtention d'une bonne ou d'une mauvaise réponse au post-test, alors que le participant avait obtenu une mauvaise réponse au pré-test.

Sans prendre en considération les quadrants du modèle circomplexe associés aux résultats, il est difficile d'interpréter davantage puisque le cadre théorique de ce travail fut élaboré en fonction de ceux-ci. Les différentes hypothèses, classées par quadrants, permettent d'approfondir les observations précédentes et de mettre en évidence les résultats attendus et contradictoires face à la littérature scientifique.

5.2 Activation élevée et valence négative (QÉ-)

H1 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est négative, le participant apprend moins efficacement (superficiellement) ou pas du tout. Il n'y a pas de changement conceptuel.

H2 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est négative, des changements conceptuels non souhaitables sont également notés.

La variation de l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est élevée et la valence négative est en relation statistiquement significative avec l'absence du changement conceptuel (H1) ou la dégradation du changement conceptuel (H2) seulement lorsque comparée avec le maintien des connaissances

scientifiques chez le participant défini par l'obtention d'une bonne réponse au pré-test ainsi qu'une bonne réponse au post-test. De plus, les observations suggèrent que les participants qui connaissent la réponse au pré-test et qui maintiennent leurs connaissances à travers le jeu vivent une intensité affective moyenne QÉ- plus élevée.

Ces résultats sont différents de ceux attendus pour H1 et H2. La combinaison d'une activation élevée et d'une valence négative suggère que les messages d'erreurs et les conflits cognitifs du participant sont perçus comme une menace qui doit être évitée (Gill, 2013 ; Nadelson, 2018). Selon Pekrun *et al.* (2023), les émotions qui sont attribuables à cette combinaison du modèle circomplexe sont associées à la colère, l'anxiété ou la honte. Ces considérations théoriques ont mené aux hypothèses H1 et H2 qui ne peuvent être validées dans le contexte de cette étude. Le maintien des connaissances scientifiques ne fut pas une hypothèse envisagée pour cette combinaison affective. Cependant, le choix de la définition de la l'absence du changement conceptuel influence cette interprétation. En effet, il serait possible d'inclure le maintien du changement conceptuel dans la définition de l'absence d'un changement conceptuel. Ceci aurait pour effet de modifier l'interprétation de H1, la rendant partiellement validée selon la définition de la mesure de l'absence du changement conceptuel. Ces considérations sont discutées ultérieurement dans les biais de l'étude. Pour la suite, une réflexion est offerte en considérant les mesures du changement conceptuel telles que définies par le cadre théorique.

Tout d'abord, une activation plus élevée, peu importe le scénario du changement contextuel, est envisageable puisque la littérature scientifique consultée semble appuyer fortement l'idée qu'un contexte de nouveauté et d'imprévisibilité provoque une activation plus élevée. Considérant le contexte d'apprentissage, le jeu sérieux Mécanika avec ses différents tableaux contient beaucoup de nouveautés et d'éléments imprévisibles pour chacun des participants et dans chacun des tableaux. Dans ces circonstances, la théorie du traitement prédictif propose que cette nouveauté génère des cycles de prédictions/correction d'erreurs de façon continue, permettant à travers le processus d'apprentissage de réduire les erreurs de prédictions de façon à minimiser les surprises (Barrett, 2017 ; Smith *et al.*, 2022). Cet effet de nouveauté maintient le corps en alerte. Les travaux de Nadelson *et al.* (2018) proposent que lors d'un conflit cognitif, l'apprenant puisse choisir de mobiliser ses ressources pour l'apprentissage (combat) ou décider de ne pas s'engager (fuite). Il est alors possible qu'une activation plus élevée relative au contexte du jeu Mécanika soit responsable de plusieurs observations notées.

Ensuite, dans le cas du maintien du changement conceptuel, les hypothèses suggèrent qu'il est possible que l'activation soit élevée, mais que le participant ressente plutôt une valence positive, tel du plaisir à démontrer ses connaissances. Ce qui est particulièrement inattendu dans les résultats est la valence négative qui est en relation avec la démonstration et le maintien des connaissances. De plus, les observations ne montrent pas de relation significative avec une dégradation du changement conceptuel chez le participant lorsqu'il y a présence d'activation élevée et de valence négative. Ces résultats viennent donc appuyer une toute petite remarque glissée dans le cadre théorique de ce travail qui mentionne que les émotions d'activation élevée et de valence négative peuvent agir positivement sur l'apprenant qui met en place des mécanismes pour éviter l'échec (Pekrun et Linnenbrink-Garcia, 2022). Il est alors possible que dans ces circonstances, le participant soit en mesure de gérer ses émotions et de poursuivre son bon travail puisqu'il démontre qu'il maintient ses connaissances scientifiques à travers son expérience de jeu dans Mécanika.

5.3 Activation élevée et valence positive (QÉ+)

H3 : Lorsque l'activation est élevée et que la valence est positive, le changement conceptuel est favorisé.
H4 : Lorsque l'activation est élevée et la valence est positive, le changement conceptuel a déjà eu lieu et est maintenu.

La variation de l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est élevée et la valence est positive est en relation statistiquement significative avec le changement conceptuel favorisé (H3) seulement lorsque comparée avec le maintien des connaissances scientifiques défini par l'obtention d'une bonne réponse au pré-test ainsi qu'une bonne réponse au post-test chez le participant. Cependant, les observations suggèrent que l'intensité affective moyenne de ce quadrant est plus élevée lorsque le participant connait la bonne réponse au pré-test et maintien ses connaissances scientifiques à travers le jeu. Ces résultats ne permettent pas de valider H3. Ceci diffère des résultats attendus basés sur les propos de Nadelson *et al.* (2018) qui considèrent que les émotions positives favorisent le changement conceptuel puisqu'elles seraient associées à la perception de l'apprenant du contexte d'apprentissage comme un défi plutôt qu'une menace. Les émotions d'activation élevées et positives, comme le plaisir, l'espoir et la fierté (Pekrun *et al.*, 2023), n'ont pas de relation significative avec le changement conceptuel tel que défini dans le cadre du jeu Mécanika. L'hypothèse H3 était la seule qui fut énoncée en faveur du changement conceptuel. Dans le cadre du jeu Mécanika, l'étude de la combinaison de l'activation et de la valence telle que définie dans le projet ne permet pas d'établir de relation avec le changement conceptuel du

participant. Ces observations ne permettent pas d'appuyer les propos de Nadelson *et al.* (2018) qui considèrent que les émotions positives favorisent le changement conceptuel. L'observation de la modification des connaissances scientifiques du participant, c'est-à-dire son apprentissage, ne peut être évaluée en ces termes dans le cadre de cette expérience. Cependant, comme mentionné plus tôt, ces interprétations dépendent entièrement de la mesure choisie pour vérifier le changement conceptuel chez le participant qui est la transition EversS dans ce cas. Considérant qu'il soit possible qu'un participant ayant obtenu une bonne réponse au pré-test poursuive son apprentissage et modifie ainsi sa compréhension des concepts de physique mécanique pour les parfaire, ce qui est observé comme un maintien des connaissances scientifiques pourrait cacher un changement conceptuel qu'il n'est pas possible de déceler.

Avec les définitions du cadre, les résultats de cette étude proposent plutôt l'acceptation de H4. Lorsque le participant connaissait au départ les conceptions scientifiques appropriées pour réussir les tableaux de Mécanika avec succès, celui-ci ressentirait des émotions positives proposées par la taxonomie de Pekrun *et al.* (2023) qui sont également associées à une forte activation.

De plus, en comparant les différents scénarios du changement conceptuel associé à ce quadrant, les résultats rapportent qu'il y a une différence significative entre la dégradation du changement conceptuel (SversE) et l'absence de changement conceptuel (EversE). Les participants qui connaissaient les réponses au pré-test ont une intensité affective QÉ+ significativement plus élevée que les participants qui ne connaissaient pas les réponses au pré-test. Il est possible d'expliquer ce résultat en considérant que le participant ressent des émotions positives lors de la démonstration de ses compétences qu'il possède effectivement en début de jeu puisqu'il connaissait la réponse au pré-test. La dégradation de ses connaissances au post-test peut s'expliquer par une plus grande difficulté chez l'apprenant à gérer des émotions d'activation élevée et de valence négative en fin d'expérience après deux heures de jeu, alors qu'il est relié à des équipements psychophysiologiques possiblement inconfortables après un moment.

5.4 Activation faible et valence négative (QF-)

H5 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative ne permet pas de changement conceptuel.

H6 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative indique que le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu.

H7 : La combinaison d'une activation faible avec valence négative est un indicateur d'une dégradation du changement conceptuel.

Parmi ces trois hypothèses associées à cette combinaison affective, l'hypothèse H6 est validée. La variation de l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est faible et la valence négative est en relation statistiquement significative avec l'absence du changement conceptuel (H5) ou la dégradation du changement conceptuel (H7) seulement lorsque comparée avec le maintien des connaissances scientifiques défini par l'obtention d'une bonne réponse au pré-test ainsi qu'une bonne réponse au post-test chez le participant. De plus, les observations suggèrent que les participants qui connaissent la réponse au pré-test et qui maintiennent leurs connaissances à travers le jeu vivent une intensité affective moyenne QF- plus prononcée.

Les observations suggèrent que les participants ayant déjà certaines bonnes conceptions scientifiques sont également portés à expérimenter une activation faible avec une valence négative dans certains moments du jeu. Une activation faible est associée au scénario où les signaux ascendants de la perception de l'environnement ne sont pas en conflit avec les prédictions de la hiérarchie supérieure (Clark, 2013). Il n'y a pas de surprise, l'attention n'est pas mobilisée. Pour cette combinaison affective, Pekrun *et al.* (2023) proposait l'ennui face au travail à accomplir, perçu comme étant trop facile pour le participant. Cette suggestion permet d'expliquer les observations de cette combinaison affective. L'invalidation de H5 et H7 propose que l'observation d'une activation faible avec valence négative ne permette pas de supporter l'idée que cette combinaison peut agir comme un frein pour du changement conceptuel ou pourrait être responsable de sa dégradation chez le participant au cours de sa séance de jeu.

5.5 Activation faible et valence positive (QF+)

H8 : La combinaison de l'activation faible avec une valence positive est enregistrée lorsque le changement conceptuel a déjà eu lieu et qu'il est maintenu.

La variation de l'intensité affective moyenne lorsque l'activation est faible et la valence est positive est en relation statistiquement significative avec le maintien du changement conceptuel seulement lorsque comparée avec l'absence de changement conceptuel ainsi que le changement conceptuel favorable. H8 est donc partiellement validée, car il n'y a pas de différence significative avec la dégradation du changement conceptuel. Smith *et al.* (2020) suggèrent que lorsque les signaux sensoriels sont prévisibles, l'activation est plutôt faible. Cette forme de désactivation combinée avec une valence positive mentionnée

par Pekrun *et al.* (2023) serait associée, dans le contexte de l'étude, au soulagement ressenti par le participant face à la réussite des tableaux de Mécanika.

Les observations montrent également qu'un participant ayant les connaissances scientifiques pour l'obtention d'une bonne réponse au pré-test ainsi qu'au post-test, ne génère pas une intensité affective QF+ plus élevée lorsque comparée au participant connaissant la réponse au pré-test, mais qui obtient une mauvaise réponse au post-test. Il est possible que l'observation de cette dégradation du changement conceptuel puisse être expliquée par les conditions associées au moment où le participant remplit le questionnaire à la fin du jeu suite à deux heures d'activité d'apprentissage avec Mécanika.

CHAPITRE 6
CONCLUSION

La conclusion de ce projet de recherche se décline d'abord par une synthèse pour ensuite exposer les biais et les limites pouvant expliquer les différents résultats obtenus. De nombreuses perspectives de recherches sont également offertes dans cette section dans l'espoir d'offrir des pistes d'études inspirantes pour la relève en éducation dans le domaine de l'étude de l'affectivité en contexte scolaire.

6.1 Faits saillants du projet de recherche

Les émotions font partie intégrante de la vie quotidienne de chaque élève et sont donc omniprésentes dans les milieux scolaires (Pekrun 2016). Cependant, l'impact des émotions sur le processus d'apprentissage n'a pas fait l'objet de plusieurs études (Tan *et al.*, 2021) puisque la réussite, les accomplissements et la performance scolaire ont plutôt été favorisés comme thèmes de recherches jusqu'à maintenant. Ce projet de recherche a pour but d'approfondir les connaissances sur la relation entre l'affectivité et l'apprentissage. Ancré dans une perspective cognitiviste, le cadre conceptuel de cette recherche repose sur des éléments issus des sciences de l'éducation, de la psychologie et des neurosciences éducationnelles. L'apprentissage est défini à l'aide du changement conceptuel qui est issu du paradigme constructiviste en éducation. Le changement conceptuel est l'ensemble des processus qui permettent à l'apprenant de modifier les conceptions scientifiques erronées à la suite du conflit cognitif issu entre ses connaissances antérieures et le phénomène qui lui est présenté (Li *et al.*, 2022).

Avec l'évolution des nouvelles technologies pour mesurer les signaux psychophysiologiques et l'avancement des outils d'analyse, il est possible d'étudier de plus près les réactions du corps et des comportements d'apprenants sur une plus petite échelle de temps dans l'espoir de mieux atteindre l'objectif de cette étude. Comme la psychologie ne prend pas en considération certaines contraintes biologiques issues du cerveau (Thomas *et al.*, 2019 ; Mackey, 2019), l'apport des neurosciences est pertinent pour quantifier et mesurer l'utilisation de variables psychophysiologiques dans l'étude de la relation entre l'affectivité (émotions, sensation, humeur) et le processus d'apprentissage. Le jeu sérieux Mécanika au Neurolab offre un contexte d'apprentissage sur les lois de physique mécanique où il est possible d'enregistrer et de traiter les données relatives à l'affectivité des participants.

Les résultats montrent qu'il y a une relation entre l'affectivité et l'apprentissage qui dépend de la nature du changement conceptuel (ou de son absence) lors du jeu sérieux Mécanika. Plus précisément, les variations de l'intensité moyenne affective sont principalement en lien avec le maintien du changement conceptuel. Ces observations permettent d'abonder dans le même sens que certaines études antérieures puisqu'elles montrent que les émotions d'activation élevée et de valence négative sont en relation avec le maintien des connaissances scientifiques qui pourrait être associé à l'évitement une situation d'échec tel que souligné par Pekrun et Linnenbrink-Garcia (2022). Toutefois, aucune des hypothèses concernant l'absence du changement conceptuel ou de la dégradation du changement conceptuel en lien avec l'affectivité n'ont pu être validées dans le cadre de cette recherche. Les données issues de cet échantillon sont insuffisantes pour répondre à certains questionnements et hypothèses. Plusieurs autres variables peuvent influencer les observations recueillies, celles-ci sont mentionnées dans les limites et biais qui suivent.

6.2 Limites et biais de l'étude

Dans le cadre d'un projet, les chercheurs établissent des hypothèses qui viendront influencer le choix des variables, la méthodologie choisie et l'interprétation des résultats. Charlot (2017) est d'avis que la recherche en éducation ne peut pas « se constituer comme champ scientifique et unitaire » (Charlot, 2017, p.3). Il argumente qu'il sera toujours possible d'analyser tout objet de recherche en éducation sous une autre forme, avec les yeux d'une autre discipline. Charlot (2017) défend que chaque objet de la recherche puisse alors être défini et considéré à l'aide des concepts des champs disciplinaires différents. Par conséquent, il devient difficile d'appliquer les principes de clôture requis par la démarche scientifique, sans compter que cette recherche emprunte des éléments théoriques du domaine de l'éducation, de la psychologie et des neurosciences éducationnelles. Le principe de la reproduction exacte d'une expérience semble également caduc dès que l'on considère que les participants eux-mêmes représentent de multiples sources de variations que l'on ne peut contrôler totalement.

Bien que les participants soient autonomes dans l'exécution de leur tâche de navigation dans les différents tableaux de Mécanika et qu'ils possèdent un certain contrôle, l'environnement du laboratoire ne permet pas de refléter un contexte en classe (validité écologique). Le contrat didactique, la relation avec l'enseignant, le travail avec les pairs, l'utilisation des équipements psychophysiologiques et bien d'autres variables encore font en sorte qu'il n'est pas possible de comparer ou généraliser les résultats de ce travail

avec un contexte d'enseignement scolaire. Cependant, il est possible de considérer que les limites d'une recherche ne la rendent pas pour autant non pertinente.

L'interprétation de la combinaison de la valence et de l'activation dans cette étude est principalement limitée par le sens attribué aux signaux à la suite de la lecture des instruments de mesure, par la transformation des données ainsi que par les biais pouvant générer des erreurs dont la source n'est pas le hasard. Il en va de même pour le changement conceptuel qui est déterminé par la comparaison des réponses au pré-test et au post-test. Plusieurs considérations sont à souligner afin de faire preuve de prudence dans l'interprétation des résultats.

6.2.1 Les limites méthodologiques

6.2.1.1 Contexte de l'étude et outils de mesure disponibles

Les participants de cette étude se portaient volontaires et ont reçu une compensation financière. Il est probable que cet incitatif influence les dispositions affectives des participants qui peuvent alors différer de celles attendues dans un contexte d'apprentissage scolaire. Il est plausible que ces volontaires se mobilisent et s'engagent plus activement dans les tâches à accomplir. En considérant la dimension de l'intention (McLure *et al.*, 2020) suggérée comme nécessaire pour l'apprentissage, ces aspects semblent importants à considérer. Elles pourraient notamment expliquer l'augmentation de l'intensité affective moyenne observée dans les différents quadrants du modèle circomplexe en relation avec le maintien du changement conceptuel chez le participant.

Un autre paramètre à considérer chez les participants est leurs réactions psychophysiologiques face à la nouveauté et l'imprévisibilité des tableaux de Mécanika. Chacun des tableaux de ce jeu sérieux est différent, donc nouveau et possiblement perçu comme imprévisible de la part du participant. La littérature scientifique consultée semble appuyer fortement l'idée qu'un contexte de nouveauté et d'imprévisibilité provoque une activation élevée. Il n'est pas réellement possible d'isoler la part de l'activation psychophysiologique attribuable à un conflit cognitif face aux conceptions scientifiques exposées, de celle associée à une réaction face aux nouveaux tableaux du jeu. Bien qu'une précaution ait été prise à cet effet en enregistrant les deux premières minutes de jeu, puis en normalisant l'activation psychophysiologique de chaque participant basée sur ces deux minutes, il n'est pas possible de garantir que ceci soit suffisant pour éviter un effet sur les résultats attribuables à une activation élevée.

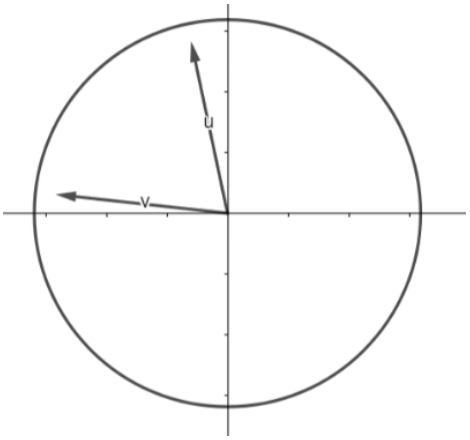
Il est à noter également qu'aucun questionnaire auto-rapporté de la perception du participant sur son affectivité n'a été utilisé. Ceci va à l'encontre de la proposition de Gardhouse et Anderson (2013) qui suggèrent de combiner les mesures psychophysiologiques, les questionnaires auto-rapportés (concernant les émotions) ainsi que les observations dans la conception du cadre conceptuel et méthodologique d'une étude. La perception du participant sur son affectivité lorsqu'il remplit les questionnaires au pré-test et au post-test permettrait de donner de meilleurs indices pour expliquer certaines observations auxquelles le cadre théorique n'a pu répondre.

De plus, certaines erreurs d'observation ont pu être commises par l'outil de mesure utilisé qui comporte des choix de réponses, soit le questionnaire du FCI permettant d'évaluer le changement conceptuel. En effet, une erreur de mesure est possible dans le cas où le participant choisit au hasard la réponse à une question posée lors pré-test ou du post-test. Cette limite méthodologique paraît importante à souligner, mais renvoie au concept de validité et de fiabilité du questionnaire du FCI qui fut adressé dans la section 3.2.1 de ce travail et démontré à nouveau plus récemment par les travaux de Murshed (2020).

6.2.1.2 Transformations des données et données nichées

Lors du traitement des données, les signaux continus de l'activation et de la valence enregistrés ont été transformés de façon à obtenir un vecteur d'intensité affective associé à l'un des quadrants du modèle circomplexe. Habituellement, un vecteur possède des composantes permettant de déterminer sa position, ainsi que sa longueur. Lors de la transformation de ces variables continues qui sont combinées en vecteur, la position exacte du vecteur n'a pu être gardée, seule sa correspondance avec un quadrant cartésien fut consignée afin de créer une correspondance avec le modèle circomplexe des émotions. Ceci fait en sorte que les données disponibles ne permettent pas de déterminer certains cas limites de la position des vecteurs tels qu'exposés dans la Figure 6.1.

Figure 6.1 Vecteurs d'intensités équivalentes après transformation en variable catégorielle, mais de positions différentes



La Figure 6.1 donne un exemple de deux vecteurs associés au quadrant d'activation élevé et de valence négative qu'il n'est pas possible de distinguer dans les données générées pour l'analyse. Ceci est important puisque l'interprétation de ces deux vecteurs pourrait comporter des différences. Le vecteur *u* est considéré de très forte activation, alors que sa valence est légèrement négative. Le vecteur *v* est associé à une activation plutôt neutre alors que sa valence est très négative. Une activation élevée ne s'interprète pas de la même façon qu'une activation plutôt neutre, ceci pourrait être une source d'erreurs issues de cette catégorisation. Il est également possible que la combinaison de l'activation et de la valence dans le modèle circomplexe des émotions, bien que souhaitable pour cette étude, soit un peu trop réductionniste pour permettre une analyse plus fine des résultats.

Les données analysées dans cette recherche sont nichées par dyade et par tableau de Mécanika. Ceci a pour conséquence d'offrir une grande quantité d'observations, mais qui ne sont pas complètement indépendantes les unes des autres. En soi, ces nombreuses données constituent une richesse pour la densité d'informations séquentielles obtenue à l'intérieur d'un intervalle de jeu d'une durée de deux heures qui est relativement petit. Ainsi, l'estimation juste des valeurs de significativité constitue l'une des forces d'une approche statistique multiniveaux. Cependant, l'analyse des données nichées ne permet pas d'obtenir facilement l'estimation des tailles d'effet, ce qui constitue une limite importante puisqu'il aurait été souhaitable de quantifier la force de la relation trouvée entre l'affectivité et les transitions du changement conceptuel.

6.2.2 Les biais possibles

6.2.2.1 Outils d'analyse et les définitions théoriques

Comme cette étude repose sur l'analyse de données secondaires, il n'était pas possible de recueillir d'autres données que celles disponibles dans le cadre de l'étude principale et ceci constitue une limite en soi. Cependant, l'utilisation du questionnaire du FCI, qui évalue les conceptions scientifiques du participant, pourrait influencer les données recueillies par le simple fait qu'il s'agit d'une évaluation pouvant engendrer des émotions chez certains participants. L'accès aux mesures psychophysiologiques du participant lorsqu'il remplit les questionnaires au pré-test et au post-test aurait été pertinent, mais ces données n'existent pas puisque l'étude principale ne les a pas recueillies. Ceci aurait permis notamment d'obtenir des données supplémentaires au sujet de l'affectivité du participant ou de sa fatigue cognitive lors des moments où il remplit les questionnaires qui évaluent ses compétences. Dans le cas d'une observation indiquant une mauvaise réponse au post-test alors que le participant connaissait la bonne réponse au départ, la consultation des signaux psychophysiologiques permettrait possiblement de peaufiner l'analyse et éviter certaines erreurs d'interprétation.

Les quatre scénarios issus de la comparaison des réponses au pré-test et au post-test, EversE, EversS, SversS et SversE furent utilisés comme échelle de mesure pour évaluer le changement conceptuel. Cette catégorisation, bien que nécessaire pour cette étude, comporte plusieurs failles à prendre en considération. En premier lieu, la transition EversE est associée à l'absence du changement conceptuel, mais elle ne prend pas en compte le fait qu'un changement conceptuel aurait pu subvenir vers une autre mauvaise conception scientifique. Aussi, à l'intérieur de la séance de jeu, un participant pourrait avoir modifié plusieurs de ses croyances et de ses conceptions scientifiques, mais de façon insuffisante pour obtenir la bonne réponse au post-test malgré une part d'apprentissage. Un autre point à considérer est le fait que l'absence de changement conceptuel peut aussi être définie par la transition SversS. En effet, un maintien du changement conceptuel est équivalent à l'absence de changement conceptuel par sa définition de statu quo. Cette constatation pourrait modifier grandement l'interprétation des résultats présentés plus haut puisque le maintien du changement conceptuel est en relation significative avec l'affectivité du participant. Il est à noter également que le maintien des bonnes conceptions scientifiques n'est pas synonyme d'aucun approfondissement des connaissances et d'aucune évolution dans la compréhension ou les croyances. Il est donc possible que SversS soit également une transition qui permet le changement conceptuel sans qu'il soit possible de l'identifier dans le cadre de cette étude. Les réponses

obtenues au pré-test et au post-test, ainsi que leur comparaison, ne constituent pas une mesure absolue ou complètement sensible du changement conceptuel ou de l'apprentissage.

6.2.2.2 Mécanika

Il a été mentionné dans la discussion qu'il soit possible de considérer l'observation d'une activation élevée, peu importe le scénario du changement conceptuel, puisque Mécanika offre en environnement d'apprentissage nouveau et imprévisible pour les participants. Il semble également important de considérer que Mécanika offre une rétroaction en temps réel des actions du joueur. L'application correcte ou incorrecte d'une loi de physique mécanique est immédiatement signalée dans le jeu puisque l'effet de déplacement d'un objet est immédiatement montré au participant. Il est possible que cette rétroaction directe influence l'affectivité du participant et génère possiblement un impact sur son apprentissage. Dans le cas d'une rétroaction négative, ceci pourrait provoquer une réponse de stress chez le joueur. Ces considérations pourraient influencer les résultats obtenus et nuire aux interprétations dans le contexte de l'étude puisqu'il n'est pas possible de contrôler les réactions d'un participant face à la nouveauté ou l'imprévisibilité. Les réponses psychophysiologiques pourraient différer d'un apprenant à l'autre bien que l'environnement du jeu sérieux soit le même pour tous.

6.3 Perspectives de recherche

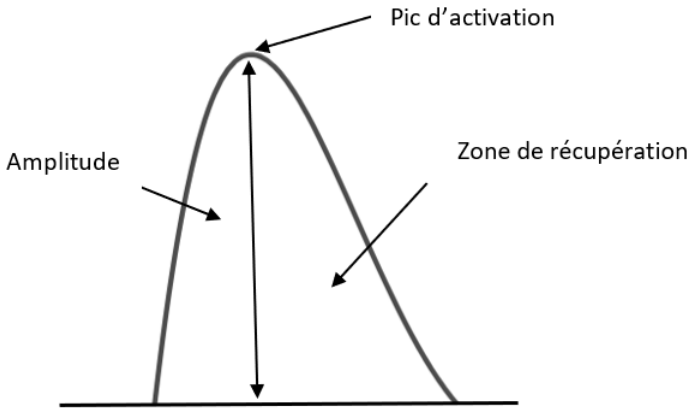
Dans le cadre de cette étude, plusieurs autres éléments d'analyse ont été identifiés pour possiblement permettre la poursuite des recherches et enrichir celles-ci par des informations pertinentes et complémentaires. La faisabilité des suggestions qui suivent n'a pas été évaluée et les suggestions elles-mêmes n'ont pas été retenues étant donné qu'elles ont été jugées trop ambitieuses dans le cadre d'une étude pour un mémoire de maîtrise.

Dans un premier temps, il aurait été avantageux de pouvoir suivre l'évolution du changement conceptuel des participants de plus près. Les tableaux de Mécanika sont construits de façon à évaluer les concepts de physique mécanique associés à des questions spécifiques du FCI. Pour une question du FCI donnée, le participant a pratiqué à plusieurs reprises cette notion dans les différents tableaux. Dans le cas où le participant avait obtenu la mauvaise réponse au pré-test et une bonne réponse au post-test (changement conceptuel souhaité), il aurait été intéressant de se pencher avec plus d'attention sur les variations de son affectivité à travers son processus d'apprentissage dans le jeu, ciblant de plus près les signatures affectives de l'apprentissage.

De même, il aurait été intéressant de se pencher pour isoler plus spécifiquement les données relatives à l'absence de changement conceptuel, dans le cas où le participant avait obtenu la mauvaise réponse au pré-test et au post-test. Il est possible que dans un contexte où le participant répond à un questionnaire, celui-ci vive un stress face à cette évaluation des connaissances qui peut venir influencer ses réponses. Il pourrait donc s'avérer judicieux d'enregistrer les mesures psychophysiologiques du participant lorsqu'il remplit les questionnaires au pré-test et au post-test pour les comparer. Ceci permettrait d'apporter de l'information supplémentaire au sujet de l'affectivité du participant lors de son action pour remplir les questionnaires qui évaluent ses compétences. En plus d'obtenir les signaux psychophysiologiques relatifs aux émotions lors de la complétion du questionnaire, l'analyse de l'affectivité dans des moments précis du jeu relié à l'absence de changement conceptuel pour certaines notions pourrait permettre de clarifier certaines données pour leur interprétation.

L'accès aux mesures psychophysiologiques en laboratoire permet également d'étudier l'amplitude et les fréquences des pics d'activation psychophysiologique. L'étude des pics d'activation pourrait apporter des informations supplémentaires sur les processus psychophysiologiques, émotifs et cognitifs à l'œuvre chez le participant. Boucsein (2012) propose d'utiliser une approche différente de l'étude des signaux de la conductance électrodermale en prenant en considération l'ensemble des points définissant la courbe observée d'activation psychophysiologique.

Figure 6.2 Schéma d'un pic d'activation psychophysiologique



Selon Boucsein (2012), ceci permet de travailler avec l'aire sous la courbe afin de quantifier de façon plus juste la force de cette activation et son effet. L'utilisation de l'aire sous la courbe et de la vitesse de

récupération d'un pic d'activation peuvent possiblement offrir une interprétation plus précise du signal d'activation (Christopoulos *et al.*, 2019). Cette approche est toujours en développement, par contre l'utilisation de manifestations physiologiques plus détaillées, dont l'analyse des pics d'activation par conductance électrodermale, pourrait notamment être une mesure de la capacité de résilience d'un individu face aux émotions négatives. Étant donné que les observations indiquent que les émotions d'activation élevée et de valence négative ne nuisent pas à la plupart des apprenants dans le maintien de leurs connaissances scientifiques, l'utilisation des mesures permettant l'évaluation de la résilience et de la gestion affective en contexte scolaire parait d'un grand intérêt pour la suite des recherches en éducation. De plus, l'analyse de l'aire sous la courbe et de la vitesse de récupération de l'activation pourrait être étudiée en lien avec les autres combinaisons affectives de l'activation psychophysiologique et de la valence émotionnelle offerte par le modèle circomplexe.

En contexte académique, il serait intéressant d'évaluer si les pics de forte activation et la vitesse de récupération ont un lien avec la valence émotionnelle afin de poursuivre l'exploration de la relation entre le modèle circomplexe des émotions et le changement conceptuel. Les questions suivantes permettraient d'approfondir l'étude du lien entre l'activation, la valence et le changement conceptuel de façon exploratoire.

Q : Y a-t-il un lien entre la vitesse de récupération du pic d'activation (vitesse de retour à la normale) et la valence émotionnelle ?
Q : Y a-t-il un lien entre la vitesse de récupération du pic d'activation et le changement conceptuel ?
Q : Y a-t-il un lien entre la fréquence des pics d'activation et la valence émotionnelle ?
Q : Y a-t-il un lien entre la fréquence des pics d'activation et le changement conceptuel ?

Lorsque ces questionnements sont considérés avec une valence négative, les hypothèses suivantes suggèrent les résultats attendus en cohérence avec le cadre théorique qui propose que la gestion d'une menace mobilise les ressources cognitives ne permettant pas leur accessibilité pour l'apprentissage.

H : L'amplitude du pic d'activation est plus prononcée lorsque la valence est négative et il y a peu ou pas de changement conceptuel.
H : Lorsque la valence est négative, la vitesse de récupération du degré d'activation est plus lente et il y a peu ou pas de changement conceptuel.

Si certains apprenants ont une meilleure capacité que d'autres à gérer leurs émotions en contexte d'apprentissage, ceci pourrait se refléter par une activation psychophysiologique élevée lors des erreurs de prédictions, mais qui serait de courte durée afin de permettre au système émotif et cognitif de libérer rapidement les ressources attribuées à la gestion des erreurs pour poursuivre l'apprentissage des notions.

Plusieurs éléments du changement conceptuel, du traitement prédictif et des émotions en contexte académique suggèrent que ce sont des variables individuelles qui seraient déterminantes dans le cycle d'apprentissage, telles les croyances, l'intention et l'engagement (Nadelson *et al.*, 2018, McLure *et al.*, 2020). Cette étude ne permet pas de mesurer précisément ces caractéristiques individuelles chez les apprenants, mais donne plutôt de l'information sur leurs composantes psychophysiologiques et émotives présentes lors des épisodes d'apprentissage. Cette approche réductionniste permet seulement de faire des liens entre les différentes combinaisons du modèle circomplexe des émotions et leur relation sur l'apprentissage défini par le changement conceptuel. Ainsi, la poursuite des recherches impliquant les caractéristiques des pics d'activation, de la valence et du changement conceptuel semble pertinente et pourrait contribuer à augmenter la compréhension de l'impact de l'affectivité sur l'apprentissage.

Ce projet de recherche s'inscrit dans une approche réductionniste qui atteint ses objectifs, soit l'augmentation des connaissances dans le domaine de l'éducation sur la relation entre l'affectivité définie par le modèle circomplexe des émotions et l'apprentissage déterminé par le changement conceptuel. En espérant que les pistes de recherches futures permettront d'inspirer la relève à approfondir l'étude des caractéristiques individuelles des apprenants en relation avec l'apprentissage, tout en incluant les émotions et l'ensemble de l'affectivité dont ils ne peuvent se dissocier.

RÉFÉRENCES

Abdel-Hamid, L. (2023). An Efficient Machine Learning-Based Emotional Valence Recognition Approach Towards Wearable EEG. *Sensors*, *23*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/s23031255

Agarkar, S. C. (2019). Influence of Learning Theories on Science Education. *Resonance*, *24*(8), 847-859. https://doi.org/10.1007/s12045-019-0848-7

Alarcão, S. M., & Fonseca, M. J. (2019). Emotions Recognition Using EEG Signals : A Survey. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 10(3), 374-393. IEEE Transactions on Affective Computing. https://doi.org/10.1109/TAFFC.2017.2714671

Anderson, J. R. (2002). Spanning seven orders of magnitude: a challenge for cognitive modeling. *Cognitive Science*, 26(1), 85–112. https://doi.org/10.1016/S0364-0213(01)00062-3

Barrett, L. F. (2017). The theory of constructed emotion: An active inference account of interoception and categorization. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *12*(1), 1-23. https://doi.org/10.1093/scan/nsw154

Boucher-Genesse François, Riopel, M., Riopel, M., Potvin, P., & Potvin, P. (2012). *Étude de différentes utilisations d'un jeu vidéo éducatif conçu spécifiquement pour intervenir sur certaines conceptions en physique mécanique: mécanika* (dissertation). Université du Québec à Montréal.

Boucsein, W. (2012). *Electrodermal Activity*. Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1126-0

Charlot, B. (2017). Formes et enjeux des recherches en éducation et formation. *Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ère nouvelle*, 50, 17-30. https://doi.org/10.3917/lsdle.501.0017

Christopoulos, G. I., Uy, M. A., & Yap, W. J. (2019). The Body and the Brain: Measuring Skin Conductance Responses to Understand the Emotional Experience. *Organizational Research Methods*, *22*(1), 394-420. https://doi.org/10.1177/1094428116681073

Clark, A. (2013). Whatever next? predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, *36*(3), 181–204. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23663408/

Clark, D. A., Crandall, J. R., &Robinson, D. H. (2018). Incentives and test anxiety may moderate the effect of retrieval on learning. *Learning and Individual Differences, 63*, 70-77. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1041608018300451

Cobo-Rendón, R., Hojman, V., García-Álvarez, D., & Cobo Rendon, R. (2023). Academic emotions, college adjustment, and dropout intention in university students. *Frontiers in Education*, *8*. https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1303765

Davidson, R. J. (2004). What does the prefrontal cortex "do" in affect : Perspectives on frontal EEG asymmetry research. *Biological Psychology*, *67*(1), 219-234. https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2004.03.008

Dehaene, S. (2018). *Apprendre! Les talents du cerveau, le défi des machines.* Paris: Odile Jacob.

Fortin, M.-F. et Gagnon, J. (2016). *Fondements et étapes du processus de recherche. Méthodes quantatives et qualitatives,* Chenelière éducation (3e édition).

Fredericks, S., ElSayed, M., Hammad, M., Abumiddain, O., Istwani, L., Rabeea, A., Rashid-Doubell, F., & Bella, A. M. E. (2021). Anxiety is associated with extraneous cognitive load during teaching using high-fidelity clinical simulation. *Medical Education Online, 26(1), 1994691*. https://doi.org/10.1080/10872981.2021.1994691

Gardhouse, K., & Anderson, A. K. (2013). *Objective and subjective measurements in affective science. In The Cambridge handbook of human affective neuroscience.* (p. 57-81). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511843716.005

Gill, M. (2003). Is It a Challenge or a Threat? A Dual-Process Model of Teachers' Cognition and Appraisal Processes During Conceptual Change. *Educational Psychology Review*, *15*, 147-179. https://doi.org/10.1023/A:1023477131081

Heddy, B. C., Taasoobshirazi, G., Chancey, J. B., & Danielson, R. W. (2018). Developing and Validating a Conceptual Change Cognitive Engagement Instrument. *Frontiers in Education*, *3*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feduc.2018.00043

Hestenes, D., Wells, M., Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *Phys. Teach. 30*, 141–158.

Hinze, S. R. et Rapp, D. N. (2014). Retrieval (Sometimes) Enhances Learning : Performance Pressure Reduces the Benefits of Retrieval Practice. *Applied Cognitive Psychology, 28(4),* 597-606. https://doi.org/10.1002/acp.3032

Jiménez-Mijangos, L. P., Rodríguez-Arce, J., Martínez-Méndez, R., & Reyes-Lagos, J. J. (2022). Advances and challenges in the detection of academic stress and anxiety in the classroom: A literature review and recommendations. *Education and Information Technologies*. https://doi.org/10.1007/s10639-022-11324-w

Klee, H. L., Buehl, M. M., & Miller, A. D. (2022). Strategies for alleviating students' math anxiety: Control-value theory in practice. *Theory Into Practice, 61(1)*, 49-61. https://doi.org/10.1080/00405841.2021.1932157

Kumar, G. S., Sampathila, N., & Martis, R. J. (2023). Classification of Human Emotional States Based on Valence-Arousal Scale using Electroencephalogram. *Journal of Medical Signals and Sensors*, *13*(2), 173-182. https://doi.org/10.4103/jmss.jmss_169_21

Lei, H., & Cui, Y. (2016). Effects of Academic Emotions on Achievement Among Mainland Chinese Students : A Meta-Analysis. *Social Behavior and Personality: an international journal*, *44*, 1541-1553. https://doi.org/10.2224/sbp.2016.44.9.1541

Li, X., Wang, W., & Li, Y. (2022). Systematically reviewing the potential of scientific argumentation to promote multidimensional conceptual change in science education. *International Journal of Science Education, 44(7)*, 1165-1185. https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2070787

Lupyan, G., & Clark, A. (2015). Words and the World : Predictive Coding and the Language-Perception-Cognition Interface. *Current Directions in Psychological Science, 24(4)*, 279-284. https://www.jstor.org/stable/44318869

Mackey, A. (2019). Commentary: Broadening the scope of educational neuroscience, reflections on Thomas, Ansari, and Knowland (2019). *Journal of Child Psychology and Psychiatry 60:4*, 493–495. https://doi.org/10.1111/jcpp.13030

Mason, L., & Zaccoletti, S. (2021). Inhibition and Conceptual Learning in Science : A Review of Studies. *Educational Psychology Review*, *33*(1), 181-212. https://doi.org/10.1007/s10648-020-09529-x

McLure, F., Won, M., & Treagust, D. F. (2020). A sustained multidimensional conceptual change intervention in grade 9 and 10 science classes. *International Journal of Science Education*, *42*(5), 703-721. https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1725174

Meehan, J-P. (2021). *Educationem sacram pragmaticam? Une philosophie pragmatiste de l'éducation à l'aune du tournant pragmatique en sciences cognitives*. Mémoire, https://archipel.uqam.ca/15970/1/M17122.pdf

Mercier, J., Whissell-Turner, K., Paradiq, A. & Avaca, I. (2020). Good Vibrations: Tuning a Systems Dynamics Model of Affect and Cognition in Learning to the Appropriate Frequency Bands of Fine-Grained Temporal Sequences of Data | Proceedings of the 9th International Conference on Software Development and Technologies for Enhancing Accessibility and Fighting Info-exclusion. Partagé le 1 février 2022 par Julien Mercier, auteur principal.

Mercier, J., Avaca, I. L., Whissell-Turner, K., Paradis, A. & Mikropoulos, T. A. (2020a). Agency Affects Learning Outcomes with a Serious Game. Dans Zaphiris, P., & Ioannou, A. (2020), *Learning and Collaboration Technologies. Human and Technology Ecosystems* (vol. 12206, p. 267-278). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50506-6_20

Mercier, J., Whissell-Turner, K., Paradis, A., Avaca, I. L., Riopel, M. & Bédard, M. (2020b). Do Individual Differeces Modulate the Effect of Agency on Learning Outcomes with a Serious Game? Dans Zaphiris, P., & Ioannou, A. (2020), *Learning and Collaboration Technologies. Human and Technology Ecosystems* (vol. 12206, p. 254-266). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50506-6_19

Miller, M., & Clark, A. (2018). Happily entangled : Prediction, emotion, and the embodied mind. Synthese, 195(6), 2559-2575. https://doi.org/10.1007/s11229-017-1399-7

Molin, F., Cabus, S., Haelermans, C., & Groot, W. (2021). Toward Reducing Anxiety and Increasing Performance in Physics Education : Evidence from a Randomized Experiment. Research in Science Education, 51(1), 233-249. https://doi.org/10.1007/s11165-019-9845-9

Morris, J., & Sah, P. (2016). Neuroscience and education: Mind the gap. *Australian Journal of Education*, *60*(2), 146-156. https://doi.org/10.1177/0004944116652913

Murshed, M. (2020). The Reliability Analysis for Force Concept Inventory. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, *24*, 143-151. https://doi.org/10.37200/IJPR/V24I5/PR201677

Nadelson, L., Heddy, B., Jones, S., Taasoobshirazi, G., & Johnson, M. (2018). Conceptual Change in Science Teaching and Learning : Introducing the Dynamic Model of Conceptual Change. *International Journal of Educational Psychology*, *7*, 151-195. https://doi.org/10.17583/ijep.2018.3349

Pekrun R. (2006). The control value theory of achievement emotions: Assumptions, corollaries, and implications for educational research and practice. *Educational Psychology Review*, 18, 315–341.

Pekrun, R., & Stephens, E. J. (2012). Academic emotions. In K. R. Harris, S. Graham, T. Urdan, S. Graham, J. M. Royer, & M. Zeidner (Eds.), *APA educational psychology handbook, Vol. 2. Individual differences and cultural and contextual factors* (pp. 3–31). American Psychological Association. https://doi.org/10.1037/13274-001

Pekrun, R., & Perry, R. P. (2014). *Control-value theory of achievement emotions.* In R. Pekrun & L. Linnenbrink-Garcia (Eds.), International handbook of emotions in education (pp. 120–141). Taylor & Francis. https://doi.org/10.4324/9780203148211

Pekrun, R. (2016). *Academic emotions*. Abingdon: Routledge.

Pekrun, R., Lichtenfeld, S., Marsh, H. W., Murayama, K., & Goetz, T. (2017). Achievement Emotions and Academic Performance : Longitudinal Models of Reciprocal Effects. *Child Development*, *88*(5), 1653-1670. https://doi.org/10.1111/cdev.12704

Pekrun R. (2018). *Control-value theory: A social-cognitive approach to achievement emotions*. In Liem G.A.D., McInerney D.M. (Eds.), Big theories revisited 2: A volume of research on sociocultural influences on motivation and learning (pp. 162–190). Information Age Publishing.

Pekrun, R., & Linnenbrink-Garcia, L. (2022). *Academic Emotions and Student Engagement*. In A. L. Reschly & S. L. Christenson (Éds.), Handbook of Research on Student Engagement (p. 109-132). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07853-8_6

Pekrun, R., Marsh, H. W., Elliot, A. J., Stockinger, K., Perry, R. P., Vogl, E., Goetz, T., van Tilburg, W. A. P., Lüdtke, O., & Vispoel, W. P. (2023). A three-dimensional taxonomy of achievement emotions. *Journal of Personality and Social Psychology*, *124*(1), 145. https://doi.org/10.1037/pspp0000448

Pelch, M. (2018). Gendered differences in academic emotions and their implications for student success in STEM. *International Journal of STEM Education*, *5*(1), 33. https://doi.org/10.1186/s40594-018-0130-7

Potter, R.F., &Bolls, P. (2011). *Psychophysiological Measurement and Meaning: Cognitive and Emotional Processing of Media (1st ed.)*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203181027

Quadt, L., Critchley, H., & Nagai, Y. (2022). Cognition, emotion, and the central autonomic network. *Autonomic Neuroscience*, *238*, 102948. https://doi.org/10.1016/j.autneu.2022.102948

Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology, 39*(6), 1161–1178. https://doi-org.proxy.bibliotheques.uqam.ca/10.1037/h0077714

SAS Institute Inc.: SAS/ACCESS® 9.4 Interface to ADABAS: Reference. SAS Institute Inc., Cary (2013)

Sander, D. (2013). Models of emotion: *The affective neuroscience approach*. In J. Armony & P. Vuilleumier (Eds.), The Cambridge handbook of human affective neuroscience (pp. 5–53). Cambridge University Press.

Schwartz, S. J., Lilienfeld, S. O., Meca, A., & Sauvigné, K. C. (2016). The role of neuroscience within psychology : A call for inclusiveness over exclusiveness. *American Psychologist, 71, 52-70*. https://doi.org/10.1037/a0039678

Seth, A. K., & Friston, K. J. (2016). Active interoceptive inference and the emotional brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *371*(1708), 20160007. https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0007

Shao, K., Stockinger, K., Marsh, H. W., & Pekrun, R. (2023). Applying control-value theory for examining multiple emotions in L2 classrooms: Validating the Achievement Emotions Questionnaire – Second Language Learning. *Language Teaching Research*, 13621688221144496. https://doi.org/10.1177/13621688221144497

SIES (2021). Informe de retención de 1er año pregrado cohortes 2016–2020.Ministerio de educación. https://www.mifuturo.cl/wp-content/uploads/2021/08/Informe_Retencion_SIES_2021.pdf (accessed September 03, 2023).

Smith, R., Schwartenbeck, P., Parr, T., & Friston, K. J. (2020). An Active Inference Approach to Modeling Structure Learning : Concept Learning as an Example Case. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *14*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncom.2020.00041

Smith, R., Friston, K. J., & Whyte, C. J. (2022). A step-by-step tutorial on active inference and its application to empirical data. *Journal of Mathematical Psychology*, *107*, 102632. https://doi.org/10.1016/j.jmp.2021.102632

Soderstrom, N. C., & Bjork, R. A. (2015). Learning Versus Performance : An Integrative Review. *Perspectives on Psychological Science*, *10*(2), 176-199. https://doi.org/10.1177/1745691615569000

Thomas, M.S.C., Ansari, D., & Knowland, V.C.P. (2019). Educational neuroscience: progress and prospects. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 60*, 477–492. https://doi.org/10.1111/jcpp.12973

Throndsen, T. U., Lindskog, M., Niemivirta, M., & Mononen, R. (2022). Does mathematics anxiety moderate the effect of problem difficulty on cognitive effort? Scandinavian *Journal of Psychology, 63(6),* 601-608. https://doi.org/10.1111/sjop.12852

Vaughn, A. R., Brown, R. D., & Johnson, M. L. (2020). Understanding Conceptual Change and Science Learning through Educational Neuroscience. *Mind, Brain, and Education*, *14*(2), 82-93. https://doi.org/10.1111/mbe.12237

Wang, J., & Wang, M. (2021). Review of the emotional feature extraction and classification using EEG signals. *Cognitive Robotics*, *1*, 29–40. https://doi.org/10.1016/j.cogr.2021.04.001

Watkins, C. (2010). Learning, Performance and Improvement. *Research Matters series No. 34.* (p. 1-16).

Weisholtz, D. S., Kreiman, G., Silbersweig, D. A., Stern, E., Cha, B., & Butler, T. (2022). Localized task-invariant emotional valence encoding revealed by intracranial recordings. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *17*(6), 549-558. https://doi.org/10.1093/scan/nsab134

Wilkinson, S., Deane, G., Nave, K., Clark, A. (2019). Getting Warmer: Predictive Processing and the Nature of Emotion. In: Candiotto, L. (eds) *The Value of Emotions for Knowledge*. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15667-1_5