

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

RELATION ENTRE LES NIVEAUX DE RÉTROACTION UTILISÉS EN ATELIER PRATIQUE ET LA CHARGE
COGNITIVE D'ÉTUDIANTS EN CUISINE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

MAÎTRISE EN ÉDUCATION (ÉDUCATION ET FORMATION SPÉCIALISÉES)

PAR

GUILLAUME SPARKS-BEAULÉ

JUIN 2024

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

En écrivant ces mots, je réalise l'ampleur des défis qui se sont présentés à moi depuis cette session d'automne 2018 où j'ai commencé à temps partiel ma maîtrise en éducation. Autour de moi, une pandémie, des décès et la maladie sont venus côtoyer de nouvelles amitiés. Le dépôt de ce mémoire représente le résultat de plusieurs années de travail. Bien que l'acte de rédaction soit souvent solitaire, sa concrétisation est le fruit d'un effort collectif. Je tiens donc à exprimer ma gratitude envers ceux qui m'ont accompagné tout au long de ce processus.

Je tiens d'abord à remercier Yves et Julien. Le mot direction (de recherche) peut être pris au sens littéraire. Yves, tu m'as aidé à trouver mon chemin, à prendre la bonne voie. Nos discussions, riches et toujours sur un pied d'égalité, m'ont permis d'aborder les cycles supérieurs avec une curiosité respectueuse de ceux qui nous ont précédés. Toujours disponible, tu as confronté ce que je croyais savoir pour faire ressortir une ébauche de vérité. Julien, tu m'as permis de repérer un angle, mon angle, pour aborder la cognition humaine. Dans un monde où la marchandisation des sciences cognitives guette les fruits de la recherche, ta rigueur scientifique est un modèle à suivre. En recherche, débattre est important, c'est de là que naît le dialogue scientifique. J'espère que nous pourrions retravailler ensemble. Merci aussi à Annie Dubeau et Henri Boudreault, l'écriture scientifique demande de l'humilité, vous m'avez obligé à jeter un regard critique sur mon travail.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers les membres du Neurolab qui m'ont épaulé dans la phase de collecte et de traitement des données. Marie-Josée, Ivan, Kathleen, Isabelle et Anthony, votre contribution a été déterminante. Sans votre précieuse aide, rien de tout cela n'aurait été possible. Votre générosité dans le partage de vos connaissances et l'expertise que vous avez apportée ont été d'une valeur inestimable. C'est un privilège d'avoir pu compter sur votre soutien.

J'ai fait cette maîtrise pour valoriser les acteurs de la formation professionnelle. Je souhaite mettre de l'avant la contribution exceptionnelle des étudiantes et étudiants qui m'ont fait confiance et embarqué dans cette collecte ambitieuse. Du gel sur la tête, des électrodes, des confidences, le tout filmé... je me demande encore ce qui vous a pris de dire oui. Je tiens aussi à remercier Johanne Gagnon et Jasmin

Tanguay qui m'ont permis de faire ma collecte sur mon lieu de travail tout en étant libéré, en croyant à la pertinence de mon projet et à ses retombés sur notre institution. Je souligne l'apport financier de la Fondation de l'ITHQ qui m'a permis de dédommager les étudiantes et étudiants du programme FCG. Le statut d'étudiant à temps partiel limite les possibilités de financement, votre support a été grandement apprécié.

Poursuivre mes études au deuxième cycle n'a guère surpris mon entourage, mon retour à l'université s'est accompagné d'une envie de tout connaître. Toutefois, ce choix n'a pas été sans sacrifices. Je suis profondément reconnaissant envers mes filles, qui, sans le savoir, ont été une source de soutien inestimable dans les moments difficiles. Vous voir grandir est le plus beau des cadeaux. J'éprouve une immense reconnaissance pour celle qui m'accompagne depuis tant d'années, Magalie. Merci d'avoir pris le temps de t'intéresser à ce que je fais, à ce que je deviens. Mes intérêts de recherche découlent de nos discussions, ce n'est pas un hasard si je m'intéresse à l'apprentissage et à la cognition, tu es une grande source d'inspiration. Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers mes parents, ainsi que leurs conjoints respectifs, qui m'ont toujours encouragé et soutenu, de même que ma sœur et mon frère qui incarnent des modèles de persévérance.

Je saisis également cette occasion pour exprimer ma gratitude envers mes amis et collègues, dont la bienveillance et les échanges enrichissants ont contribué à façonner ma réflexion tout au long de ce parcours. Traduire la complexité relative de mes recherches en termes accessibles est un exercice précieux qui a bénéficié de vos questionnements et de vos conseils avisés.

Enfin, je ne saurais conclure sans adresser un hommage appuyé aux actrices et acteurs de la formation professionnelle. Bien que souvent relégués aux marges des institutions et du discours public, votre diversité et votre dévouement représentent une source inépuisable de richesse et de potentiel. Je suis profondément honoré de pouvoir contribuer, à ma modeste échelle, à la valorisation de votre indispensable travail au sein de notre société.

DÉDICACE

Pour Annette et Pauline.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
DÉDICACE	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xi
RÉSUMÉ.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE	3
1.1 Contexte de l'étude : la formation pratique en cuisine.....	4
1.2 Rétroactions et cognition.....	6
1.3 La charge cognitive et son incidence sur l'apprentissage.....	9
1.4 Problème de cette recherche	11
1.5 Pertinence scientifique et sociale de cette recherche.....	12
1.6 Question générale de recherche.....	13
CHAPITRE 2 CADRE THÉORIQUE.....	14
2.1 Les rétroactions.....	14
2.1.1 Historique.....	14
2.1.2 Définitions.....	15
2.1.3 Effets des rétroactions sur la performance	17
2.1.3.1 Modèles et niveaux de rétroaction.....	18
2.1.3.2 Le modèle KR-KCR-EF.....	19
2.1.3.3 Le modèle de rétroaction efficace de Hattie et Timperley.....	19
2.1.3.4 Niveau d'expertise de l'apprenant relativement à l'objet d'apprentissage.....	21
2.1.3.5 Moment de la rétroaction et complexité de la tâche.....	22
2.1.4 Modèle opérationnel de la recherche	24
2.2 La charge cognitive.....	27
2.2.1 Historique.....	27
2.2.2 Définitions.....	28
2.2.2.1 Mémoire de travail et mémoire à long terme	28
2.2.2.2 Théorie de la charge cognitive.....	29

2.2.3	Modèle de charge cognitive en éducation	31
2.2.4	Mesures de la charge cognitive	35
2.2.5	Critiques conceptuelles et limites empiriques.....	37
2.3	Objectifs de cette recherche.....	39
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....		41
3.1	Échantillon.....	41
3.2	Mesures.....	42
3.2.1	L'électroencéphalogramme	42
3.2.2	La désynchronisation frontale et pariétale comme mesure de la charge cognitive	42
3.3	Devis.....	45
3.3.1	Planification et choix de la tâche d'apprentissage comme contexte d'expérimentation	45
3.3.2	Déroulement.....	46
3.4	Préparation des données et plan d'analyse.....	47
3.4.1	Codage des niveaux de rétroaction	47
3.4.2	Préparation du signal EEG et calcul de la métrique de charge cognitive	48
3.4.3	Superposition de la vidéo et de la mesure de charge cognitive	49
3.4.4	Plan d'analyse	49
3.4.4.1	Définition des trois variables dépendantes	49
3.4.4.2	Le modèle d'analyse multiniveaux linéaires.....	50
CHAPITRE 4 RÉSULTATS.....		52
4.1	Analyses descriptives des données	52
4.2	Analyses inférentielles des données	53
4.2.1	Effets du niveau de rétroaction sur la charge cognitive pendant la rétroaction.....	53
4.2.2	Effets du niveau de rétroaction sur la charge cognitive pendant la rétroaction et en fonction de la référence de base.....	55
4.2.3	Effets du niveau de rétroaction sur la différence de charge cognitive pendant et précédant la rétroaction	56
CHAPITRE 5 DISCUSSION		59
5.1	Discussion des résultats	59
5.1.1	Résultats en fonction des trois variables dépendantes.....	60
5.1.2	Résultats en fonction des trois modérateurs influençant l'effet des rétroactions	61
5.1.3	Résultats en fonction de l'effet de renversement dû à l'expertise.	62
5.2	Limites de la recherche	63
5.3	Implications de l'étude.....	65
5.3.1	Implications scientifiques	65
5.3.2	Implications sociales	67
CONCLUSION		69
ANNEXE A MATRICE DE GAN (2011)		71

APPENDICE A Certificat d’approbation éthique72

APPENDICE B Formulaire de consentement73

RÉFÉRENCES77

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Le modèle de rétroaction opérant sur quatre niveaux, adapté de Hattie et Timperley (2007, p.87)	26
Figure 2.2 Additivité des composantes selon la théorie de la charge cognitive	31
Figure 2.3 Le modèle de charge cognitive en éducation, adapté de Sweller (2005)	32
Figure 3.1 Positionnement des électrodes Fz/Pz adapté de Yazdani et collègues (2012)	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Exemple des niveaux de rétroaction pouvant être donnés à un apprenant.....	21
Tableau 2.2 Effets des niveaux de rétroaction sur l'apprentissage en fonction du niveau d'expertise, de la complexité de l'apprentissage et du moment où elles sont données	24
Tableau 3.1 Niveaux de rétroaction fournis à l'apprenant pendant le taillage de la macédoine.....	47
Tableau 4.1 Nombres de rétroactions données aux étudiants en fonction du niveau et de la session	53
Tableau 4.2 Estimation des effets fixes des niveaux de rétroaction et de la session sur la CC pendant la rétroaction.....	54
Tableau 4.3 Moyennes réelles des mesures de CC pendant la rétroaction en fonction du niveau de rétroaction et de la session	54
Tableau 4.4 Estimation des effets fixes des niveaux de rétroaction et de la session sur la CC pendant la rétroaction et en fonction de la référence de base	55
Tableau 4.5 Moyennes réelles des mesures de CC par rapport à la référence de base de chaque participant pendant la rétroaction en fonction du niveau de rétroaction et de la session.....	56
Tableau 4.6 Estimation des effets fixes des niveaux de rétroaction et de la session sur la différence de CC pendant et avant la rétroaction	57
Tableau 4.7 Moyennes réelles de la différence de CC pendant et précédant la rétroaction en fonction du niveau de rétroaction et de la session.....	57

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

%DRE	Pourcentage de désynchronisation relié à un évènement
ANOVA	Analyse de variance
CC	Charge cognitive
CE	Charge extrinsèque
CG	Charge germane/essentielle
CI	Charge intrinsèque
DEP	Diplôme d'études professionnelles
EEG	Électroencéphalogramme
EF	<i>Elaborated feedback</i>
ERE	Effet de renversement dû à l'expertise
FP	Formation professionnelle
FT	Formation technique
FTP	Formation professionnelle et technique
Hz	Hertz
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
ITHQ	Institut de tourisme et d'hôtellerie du Québec
KCR	<i>Knowledge of correct result</i>
KR	<i>Knowledge of result</i>
K Ω	Kiloohm
MDT	Mémoire de travail
MLT	Mémoire à la long terme
RA	Rétroaction sur l'autorégulation
RéfB	Référence de base
RP	Rétroaction sur le processus
RS	Rétroaction sur le soi
RT	Rétroaction sur la tâche
SBME	<i>Simulation based medical education</i>
TCC	Théorie de la charge cognitive
UQAM	Université du Québec à Montréal

RÉSUMÉ

La formation à un métier implique, pour plusieurs d'entre eux, de fréquentes situations d'apprentissage pratique en atelier. Dans ce contexte, l'enseignant doit fournir de multiples rétroactions verbales à l'apprenant. Ces rétroactions peuvent être prodiguées de façon occasionnelle ou soutenue, en fonction de la situation et de ce que le formateur observe chez l'apprenant. Ces rétroactions n'ont pas toujours un effet positif. Le tiers des rétroactions auraient un impact nul ou négatif sur la performance. L'effet de la rétroaction sur la charge cognitive peut expliquer l'impact limité des rétroactions. Cette explication peut d'ailleurs être approfondie en tenant compte du niveau de rétroaction. Toutefois, aucune étude n'a confronté ce modèle théorique dans un contexte de rétroaction en temps réel, comme c'est le cas lors de la formation pratique en atelier. Cette étude vise donc à explorer la relation entre le niveau de la rétroaction fournie par l'enseignant et la charge cognitive associée au traitement de cette rétroaction par l'apprenant, à différents stades du développement de sa compétence. Pour ce faire, des données ont été recueillies au sein d'un atelier de cuisine, impliquant 33 étudiants en début ou en fin de programme de formation de cuisinier. Pendant la réalisation de la tâche, quatre niveaux de rétroaction ont été proposés et la charge cognitive des étudiants a été mesurée à l'aide d'un électroencéphalogramme portable. Les résultats des analyses multiniveaux ont révélé que les niveaux de rétroaction n'ont pas tous le même impact sur la charge cognitive, mais pour les étudiants de première session seulement. Cette distinction est explicable par la théorie de la charge cognitive et supportée par l'effet de renversement dû à l'expertise. Ainsi, cette recherche a permis d'observer, dans un cadre inédit, un changement psychophysologique entre les novices et les apprenants ayant acquis une certaine expertise. En conclusion, ces résultats fournissent un éclaircissement sur la manière dont le traitement cognitif du niveau de rétroaction est influencé par le niveau d'expertise de l'apprenant, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de ce phénomène dans le contexte spécifique de l'apprentissage d'un métier.

Mots clés : rétroaction, charge cognitive, formation professionnelle, EEG (électroencéphalogramme), neuroscience éducationnelle

ABSTRACT

Preparing for a vocational profession frequently entails regular hands-on learning encounters in workshops across various fields. In this setting, instructors must provide learners with numerous verbal feedback sessions. These feedback may occur sporadically or consistently, depending on the circumstances and the learner's progress observed by the instructor. However, not all feedback has a positive impact. In fact, one-third of feedback instances might have a neutral or negative effect on performance. The influence of feedback on cognitive load could explain why feedback's impact is sometimes limited. This rationale could be further explored by considering the feedback level. Nonetheless, no study has tested this theoretical framework in real-time feedback contexts, such as those encountered during practical workshop training. Hence, this study aims to investigate the correlation between the level of feedback provided by instructors and the cognitive load experienced by learners as they process this feedback at various stages of skill development. To accomplish this, data were collected from a cooking workshop involving 33 students at the beginning or end of their culinary training program. Throughout task execution, four levels of feedback were administered, while students' cognitive load was measured using portable electroencephalography (EEG). Multilevel analyses revealed that not all feedback levels exert the same impact on cognitive load, particularly among first-session students. This disparity aligns with cognitive load theory and is reinforced by the expertise reversal effect. Thus, this study offers a unique insight into the psychophysiological changes observed between novice learners and those with a certain level of expertise within an innovative framework. In conclusion, these findings shed light on how learners' cognitive processing of feedback levels is influenced by their expertise level, thereby enhancing our understanding of this phenomenon within the specific context of vocational training.

Keywords : feedback, cognitive load, vocational training, EEG (electroencephalogram), educational neuroscience

INTRODUCTION

En formation professionnelle, les ateliers pratiques déterminent des lieux d'apprentissage riches en interactions diverses. D'un côté, l'apprenant perçoit et traite différentes informations provenant entre autres de son environnement, de l'outillage qu'il utilise, des produits qu'il manipule, de ses collègues et de son enseignant. De l'autre, l'enseignant qui observe l'étudiant travailler évalue celui-ci sur différents aspects : le geste de l'étudiant est-il perfectible, la production répond-elle aux normes spécifiées, le poste de travail est-il sécuritaire et ergonomique, l'exécution de la tâche a-t-elle été planifiée ? Ces prises d'informations mutuelles permettent d'échafauder une relation pédagogique située dans l'action où ce qui est perçu de part et d'autre découle de l'expérience vécue par chacun des acteurs. Un certain décalage perceptuel opère inévitablement entre le novice en apprentissage et l'expert qui utilise ses propres référents (Dreyfus, 2002; Merleau-Ponty, 2009).

La rétroaction de l'enseignant s'insère dans cette situation éducative complexe et impose un coût d'option cognitif à l'apprenant qui doit construire du sens à partir de sa propre représentation de la situation en détournant son attention de la tâche vers l'enseignant. Il est bien établi que, malgré la fréquence des rétroactions, environ un tiers d'entre elles ne semble pas avoir d'impact significatif sur l'apprentissage, tel que mesuré par la performance aux évaluations (Kluger & DeNisi, 1996; Wisniewski et al., 2020). L'enseignant fait face au dilemme suivant : intervenir pour tenter de modifier une pratique ou attendre que l'étudiant ait terminé afin de faire un suivi avec celui-ci. Si l'enseignant choisit de donner une rétroaction, celle-ci doit permettre de réduire l'écart entre ce que l'apprenant fait, ce qu'il croit faire et ce qu'il devrait faire (Hattie et Timperley, 2007). La cognition de l'apprenant demeure spéculative des manifestations comportementales visibles. Les neurosciences éducationnelles peuvent étudier, à partir de données psychophysiologiques, la cognition de l'apprenant telle qu'expérimentée par celui-ci et en lien avec les théories et modèles d'apprentissage issus des sciences de l'éducation et de ses disciplines contributives (Campbell et Pagé, 2012).

Cette recherche émane de l'observation d'étudiants en atelier pratique et souhaite décrire davantage la relation entre la rétroaction donnée à l'étudiant et la charge induite par le traitement

cognitif de cette rétroaction. Elle s'appuie sur l'intégration de deux cadres théoriques, le modèle de rétroaction efficace de Hattie et Timperley (2007) et la théorie de la charge cognitive de Sweller (1988, 2019). Le premier chapitre de ce mémoire introduit la problématique en lien avec cette relation en décrivant le contexte particulier des ateliers pratiques. Il souligne la nécessité de produire davantage de données contextuelles fines, c'est-à-dire indexées précisément dans le temps, afin de mieux documenter l'influence en temps réel des rétroactions sur la cognition de l'apprenant. Il se clôt avec la formulation de la question de recherche.

Le deuxième chapitre détaille le cadre théorique de cette recherche. Il offre une analyse conceptuelle de la rétroaction en détaillant son influence sur l'apprentissage et de la charge cognitive en éducation en exposant les facteurs environnementaux, scolaires et individuels qui modulent l'apprentissage selon ce modèle. Il se conclut avec la présentation des objectifs de cette recherche.

Le troisième chapitre décrit la méthodologie adoptée pour répondre à la question de recherche et atteindre les objectifs de cette recherche corrélationnelle. Il détaille le recrutement et la composition de l'échantillon, constitué d'étudiants en cuisine débutants et avancés. Le choix de la tâche effectuée est justifié en lien avec le programme d'études, le contexte d'apprentissage pratique et la théorie de la charge cognitive. Les mesures utilisées, notamment les niveaux de rétroaction et la réponse psychophysologique, sont également expliquées. Il se conclut sur la sélection des variables dépendantes et la stratégie d'analyse des données quantitatives.

Les résultats obtenus à la suite de la collecte de données et des analyses multiniveaux sont exposés dans le quatrième chapitre. L'analyse se concentre sur les liens significatifs entre le niveau de rétroaction (variable indépendante) et les trois indicateurs de charge cognitive sélectionnés (variables dépendantes), permettant ainsi de répondre aux objectifs de la recherche.

Enfin, le cinquième chapitre discute des résultats obtenus en lien avec les recherches antérieures portant sur la rétroaction et la cognition. Il explore les perspectives de recherches futures et évalue la portée des résultats en reconnaissant les limites de la recherche. Les implications scientifiques et sociales concluent ce dernier chapitre, les résultats laissant entrevoir la possibilité d'améliorer les connaissances savantes sur la cognition et développement de l'expertise, de même que des pistes pour soutenir les apprentissages en atelier pratique.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE

L'impact des pratiques pédagogiques sur l'apprentissage des étudiants constitue un axe de recherche fondamental en sciences de l'éducation. Développé à travers différentes disciplines, ce questionnement tente avant tout de valider les approches pédagogiques bénéfiques pour les apprentissages des étudiants, donc à faciliter le développement de compétences formelles. Lors d'une situation d'apprentissage, la structure dialogique entre l'enseignant et l'étudiant réside dans l'échange d'informations. Les ajustements respectifs sont opérés en fonction de ce qui est mutuellement perçu (Lenoir, 2014). L'étudiant agit, l'enseignant évalue l'action par un retour verbal ou écrit sur celle-ci, la rétroaction. La rétroaction demeure un outil d'apprentissage puissant (Bangert-Drowns et al., 1991; Hatala et al., 2014; Hattie et Clarke, 2019; Hattie et Timperley, 2007; Kluger et DeNisi, 1996) : ce qui est visible peut être évalué. Si le geste conscient peut parfois être expliqué par l'étudiant, la genèse cognitive l'y ayant amené l'est rarement. Cependant, le contexte de formation, l'interdisciplinarité et des méthodes de collecte de données innovantes peuvent nous renseigner sur l'invisible, notamment sur l'effet de la rétroaction sur la cognition de l'apprenant.

L'avènement de nouvelles technologies a remis en question certaines pratiques établies, les outils de recherche des neurosciences permettant parfois de valider ou d'infirmer certains construits théoriques (Howard-Jones et al., 2016). Bien que fortement présentes en sciences de l'éducation (Ansari et al., 2012), les méthodologies et objets de recherche issus des neurosciences éducationnelles ne font pas consensus quant à leur apport appliqué (Bowers, 2016a; Tommerdahl, 2010). Certains auteurs minimisent l'impact qu'aurait l'apport des neurosciences sur les méthodes d'apprentissage et les stratégies de remédiation au profit de données comportementales (Bowers, 2016b, 2016a; Bruer, 1997) alors que d'autres proposent la construction de ponts entre les neurosciences et les disciplines contributives des sciences de l'éducation, et demeurent confiants envers les approches pédagogiques pouvant découler de ces associations (Anderson, 2002; Ansari et al., 2012; Gabrieli, 2016; Geake et Cooper, 2003; Howard-Jones et al., 2016).

Ce premier chapitre vise à contextualiser la présente étude et se divise en six parties. Dans un premier temps, le contexte de la formation pratique, à travers ses exigences et contraintes, sera décrit. Ensuite, la

relation entre la rétroaction et la cognition sera abordée afin de mettre en perspective différentes positions scientifiques et leurs limites. Une introduction à la théorie de la charge cognitive suivra afin d'établir son incidence sur l'apprentissage. Le problème de cette recherche sera subséquemment contextualisé sur la base des connaissances existantes à approfondir et suivra la pertinence scientifique et sociale de cette recherche. Ce chapitre se conclura avec la question de recherche.

1.1 Contexte de l'étude : la formation pratique en cuisine

Au Québec, le milieu de la formation professionnelle et technique (FTP) compte plus de 300 programmes d'études¹ répartis en 21 secteurs d'activités et regroupant quelque 200 000 étudiants (MELS, 2010b). Ce modèle de formation permet un accès rapide au marché du travail (MELS, 2010). Par ailleurs, les enseignants et les enseignantes proviennent en majeure partie du milieu de pratique professionnelle (MEES, 2016). Si la pertinence des neurosciences en éducation demeure un enjeu d'actualité (Robichaud et al., 2018; Tan et al., 2023), la recherche en formation professionnelle (FP) et technique (FT) est émergente et semble accorder peu d'intérêt à ce débat. En FPT, les enseignants adoptent généralement des approches pédagogiques éclectiques, voire interdisciplinaires, émanant de la psychologie cognitive et d'autres disciplines connexes (Bégin, 2008; Monchatre et CIRST, 2008; Tardif, 2007). Toutefois, il est important de noter que ces approches ne font pas toujours l'objet d'un consensus au sein de la communauté scientifique, bien qu'elles soient parfois acceptées au sein de la communauté de praticiens (Kirschner et al., 2006; Wheelahan, 2009). Pourtant, plusieurs stratégies pédagogiques font l'objet de recherches en science de l'éducation. Une taxonomie des facteurs influençant l'apprentissage a notamment été mise de l'avant, dénombrant les différentes mesures d'accompagnement pédagogique et leurs effets sur la réussite (Hattie, 2012; Kirschner et al., 2006). Parmi ces mesures, la rétroaction a depuis longtemps été identifiée comme étant un facteur primordial favorisant l'apprentissage (Hattie et Clarke, 2019; Hattie et Timperley, 2007; Kluger et DeNisi, 1996; Mory, 2004; Shute, 2008), mais ses implications sur la cognition de l'apprenant en temps réel, donc durant la tâche, demeurent à ce jour exploratoires.

Afin de bien décrire le milieu de la présente étude, il importe de contextualiser le caractère pratique du programme professionnel de formation en cuisine actuel (MELS et al., 2008). En effet, celui-ci détermine un milieu d'apprentissage où l'étudiant construit ses compétences à travers différents exercices se

¹ Le secteur de la FPT compte en 2024 130 diplômes d'études professionnelles et 181 diplômes d'études collégiales techniques [Diplôme d'études professionnelles \(DEP\) - Inforoute FPT](#) et [Diplôme d'études collégiales \(DEC\) - Inforoute FPT](#)

déroulant habituellement en classe de cuisine, aussi appelé atelier pratique. En analysant le programme de formation de 1470 heures, sur les 24 compétences à acquérir pour l'obtention du diplôme d'études professionnelles, 19 compétences (1290 heures) doivent être exécutées dans un contexte de réalisation pratique, donc dans un atelier. Le programme collégial de Gestion d'un établissement de restauration (MELS et al., 2005) vise quant à lui à former des gestionnaires. Une formation de base en cuisine est aussi obligatoire et les étudiants sont alors confrontés au même contexte d'apprentissage que leurs collègues de la FP. Les activités d'apprentissage en atelier sont donc organisées en de longs segments d'activités pratiques au cours desquelles les enseignants fournissent des rétroactions aux étudiants. La manière dont les enseignants fournissent leurs rétroactions repose sur des préférences personnelles découlant de leurs expériences professionnelles. Il convient de noter qu'au Québec, aucune recherche n'a été entreprise dans ce domaine spécifique et que la formation des maîtres aborde généralement de manière plus large l'organisation des rétroactions en atelier.

Le développement des compétences associées aux techniques culinaires en cuisine, comme le désossage d'un morceau de viande, est intimement lié à des éléments de compétence référant à des savoir-faire. Il exige non seulement l'acquisition de connaissances déclaratives, mais également une pratique supervisée, suivie d'une autonomie progressive dans l'exécution des techniques spécifiées. Les ateliers pratiques, où les étudiants acquièrent et perfectionnent ces différents éléments de compétence, constituent donc des milieux riches en interactions et demandent à l'enseignant un accompagnement soutenu. En effet, contrairement aux traces laissées par des productions écrites qu'il peut évaluer *a posteriori*, telles qu'une évaluation examinant les connaissances du vocabulaire professionnel, l'enseignant dispense des rétroactions verbales à l'étudiant en fonction de ses actions ou en réponse à ses questions. Par exemple, l'enseignant peut relever la coupe irrégulière d'un légume ou mentionner à l'étudiant que sa posture nuit à la stabilité de son couteau. Ainsi, le contexte de l'atelier pratique induit et prescrit aux enseignants d'évaluer les productions des étudiants à différents moments durant la phase de réalisation de la tâche (MELS, 2010a). Les processus cognitifs mis en œuvre par l'étudiant pendant l'action peuvent être visibles à travers des comportements observables et des productions normatives. Cela permet de comparer ce qui a été réalisé à ce qui est attendu par l'enseignant, donc évaluables au moyen d'une grille d'évaluation. Cependant, systématiser les ajustements cognitifs effectués pendant une tâche d'apprentissage où la rétroaction est immédiate et verbale devient complexe.

D'une part, les rétroactions de l'enseignant sont déduites de ce qu'il observe et de ce qu'il prête comme intention à l'apprenant. D'autre part, celui-ci traite la rétroaction et ce traitement lui impose une certaine charge cognitive. Les processus cognitifs activés conjointement par les acteurs de la situation pédagogique fluctuent à la milliseconde et se font de manière simultanée entre eux (Anderson, 2002; Di Paolo & De Jaegher, 2012). Ils sont ainsi difficilement observables autrement que par des manifestations comportementales (Ladouce et al., 2017). L'impact de la rétroaction de l'enseignant ne peut donc être validé que par une action concrète de l'apprenant. Il devient alors laborieux pour l'enseignant de faire des rétroactions ciblées s'il ne connaît pas les raisons qui ont mené l'apprenant à agir ou non dans une situation. Il doit se référer au résultat. Pour l'apprenant, les rétroactions ont parfois un impact limité puisque celui-ci n'est pas nécessairement conscient des actions préalables qui l'ont conduit à une situation d'impasse à corriger (Hattie et Timperley, 2007). Ceci pourrait potentiellement expliquer l'impact modéré des rétroactions, étant donné qu'environ un tiers d'entre elles ne semblent pas influencer l'apprentissage tel qu'évalué par la démonstration observable du comportement attendu (Kluger & DeNisi, 1996; Van der Kleij et al., 2015; Wisniewski et al., 2020). Par ailleurs, plusieurs études indiquent qu'un accompagnement soutenu, donc avec de multiples rétroactions, est particulièrement bénéfique en début de programme, celles-ci pouvant s'espacer par la suite avec le développement de l'expertise de l'apprenant (Hatala et al., 2014; Kirschner et al., 2006; Sweller et al., 2019). Il est donc essentiel de déterminer les facteurs influençant l'impact de la rétroaction sur la performance.

1.2 Rétroactions et cognition

En formation professionnelle, plus précisément en atelier pratique, lors d'une production en cuisine, l'étudiant est amené à mobiliser des ressources internes (savoirs, savoir-faire, savoir-être) et externes (environnement, outillages, enseignant, collègues) pour atteindre un but de formation tout en interprétant dans l'action les incidences de sa pratique sur sa production (Filliettaz et al., 2010; Heusdens et al., 2016). L'enseignant peut accompagner l'étudiant durant les différentes étapes de la tâche en le soutenant d'une manière directe, à l'aide de rétroactions pointant un niveau de la production (tâche, processus, autorégulation et soi/affect), ou indirecte, en le laissant expérimenter des ressources personnelles de résolutions de problème. Afin de respecter le caractère pratique du contexte de formation et le mode de communication principalement utilisé en atelier, la dimension verbale de la rétroaction sera considérée. Il est ainsi possible de la définir en s'appuyant sur les travaux de Dejnozka et collègues (1991), Hattie et Timperley (2007), Kluger et DeNisi (1996), ainsi que Mory (2004) :

Au cours d'une tâche d'apprentissage, la rétroaction verbale est l'information fournie à l'apprenant par l'enseignant, à la suite d'une action délibérée ou non, ayant pour but de confirmer, rejeter ou modifier une action préalable.

Les rétroactions peuvent être catégorisées en plusieurs types distincts. Par exemple, certaines sont immédiates tandis que d'autres sont différées. Elles peuvent également être normatives, visant à évaluer la conformité du résultat, ou explicatives, mettant l'accent sur la méthode utilisée. En outre, elles peuvent être concurrentes, impliquant plusieurs rétroactions pour une même action, ou terminales, se résumant à une seule rétroaction pour l'ensemble de la production (Hatala et al., 2014; Kluger et DeNisi, 1996; Mason et Bruning, 2001). Les types de rétroaction réfèrent à un objectif de l'enseignant de fournir un retour sur l'action de l'apprenant. Les rétroactions peuvent également être catégorisées en niveaux et correspondre à un aspect précis de la production ou de la planification de l'étudiant (niveau de rétroaction sur la tâche, le processus, l'autorégulation et le soi/affect). Les niveaux de rétroaction ont des effets différents sur l'apprentissage de l'apprenant (Hattie et Timperley, 2007; Van der Kleij et al., 2015). Bien que ces niveaux de rétroaction soient initiés par l'enseignant, leur effet dépend de la manière dont l'apprenant les interprète et les intègre ou non dans son processus d'apprentissage. (Hattie et Clarke, 2019; Hattie et Timperley, 2007). Dans ce contexte, l'apprenant recourt au niveau de rétroaction pour cibler un aspect spécifique de sa production. Par exemple, un niveau de rétroaction portant sur le processus permet à l'apprenant de vérifier ou de corriger la méthode utilisée, allant au-delà de l'évaluation de la qualité du résultat, qui correspond à un niveau plus élémentaire. Contrairement aux types de rétroaction qui sont davantage contrôlés par l'enseignant, les niveaux de rétroaction se concentrent sur la façon dont l'apprenant traite ces informations et sont donc essentiels pour étudier l'impact cognitif des rétroactions sur l'apprenant.

La rétroaction est une stratégie pédagogique utilisée par l'enseignant pour informer l'étudiant. Ce retour sur l'action étant intrinsèque à l'apprentissage et au contexte pratique de réalisation de la tâche, il est pertinent de se questionner sur la nature de la relation entre le niveau de rétroaction et de ses effets sur la cognition de l'apprenant. Dans une perspective cognitiviste, la cognition réfère aux processus mentaux qui se produisent afin de décoder, comprendre ou assimiler une information (Matlin, 2001; Tardif, 2007). Ce traitement de l'information peut être examiné sous différentes temporalités, des activations neuronales opérant à la microseconde à des apprentissages faits sur plusieurs heures. Les données temporelles fines découlent de l'architecture cognitive de Newell (1994) et sont les données, cérébrales par exemple, qu'il est possible d'observer et d'interpréter lorsque nous étudions un processus cognitif se

déroulant entre 0,01 seconde et une seconde. Sous la limite inférieure, nous étudions davantage des processus biologiques, alors que les phénomènes se produisant au-dessus d'une seconde sont davantage considérés comme des manifestations comportementales (Anderson, 2002). Les données temporelles fines paraissent ainsi toutes indiquées pour étudier la relation entre la rétroaction verbale et la cognition de l'apprenant en temps réel. Elles permettent de vérifier l'impact de la rétroaction non pas en fonction des actions de l'apprenant mais à partir de comment celui-ci traite cognitivement la rétroaction dans l'action, en atelier. La relation entre les rétroactions et la cognition a fait l'objet de plusieurs études, mais les modèles parviennent difficilement à la décrire empiriquement (Boud et Molloy, 2013; Hattie et Timperley, 2007; Shute, 2008; Yang, 2017). Cette difficulté est particulièrement liée à l'absence de données temporelles fines, c'est-à-dire d'observations de la cognition humaine à une fréquence élevée telles que le permettent les outils de mesure issus des neurosciences. Si les cadres théoriques utilisés en neurosciences prescrivent davantage des contextes de collecte contrôlés, plusieurs chercheurs estiment que des collectes de données en milieu naturel sont nécessaires afin de favoriser la validité écologique et le transfert des résultats (Chang et al., 2022; Tan et al., 2023).

Le traitement de l'information s'articule en mettant en relation les nouveaux contenus, l'acquisition, à ce que l'apprenant sait déjà, la récupération. Ce processus d'acquisition et de récupération d'information est itératif et nécessaire à l'apprentissage (Atkinson et Shiffrin, 1968; Fyfe et al., 2015; Matlin, 2001). L'enseignant utilise la rétroaction telle une stratégie pédagogique pouvant favoriser ce processus d'acquisition et de récupération, en fournissant à l'apprenant un retour sur l'action lui permettant de confirmer, rejeter ou modifier une façon de faire. Cet accompagnement se veut bénéfique pour les apprentissages de celui-ci, mais les études mentionnent que ce n'est pas toujours le cas (Kluger & DeNisi, 1996; Van der Kleij et al., 2015; Wisniewski et al., 2020). Puisque l'enseignant demeure confronté à une observation comportementale découlant de cet accompagnement, la cognition de l'apprenant durant l'action et après la rétroaction demeure spéculative. L'apprenant évolue dans des situations scolaires complexes, le fait de ne pas manifester immédiatement une modification de geste professionnel ou de technique prescrite n'indique en rien que la rétroaction n'a pas eu un effet sur l'apprentissage de celui-ci (Aizawa, 2017; Gabrieli, 2016), peut-être l'apprenant a-t-il besoin de plus temps ou de pratique pour que l'enseignant puisse observer l'effet réel de sa rétroaction. Cette distinction cognition/comportement explique en partie la difficulté à modéliser la relation entre la rétroaction et la cognition.

Plusieurs études s'intéressent aux types et niveaux de rétroactions. Les modèles utilisés par les auteurs varient (Shute, 2008), mais un certain regroupement permet de dégager une terminologie utilisable dans un contexte de recherche en formation pratique. Les rétroactions ont des impacts cognitifs différents selon leur nature. Les études s'intéressant à cette relation sont cependant rarement contextualisées en formation pratique et visent avant tout à mesurer la rétention d'information (savoirs déclaratifs), la performance et le transfert (Fyfe et al., 2015; Hattie & Timperley, 2007; Moreno, 2004; Van der Kleij et al., 2015). Le contexte de l'atelier pratique en cuisine se révèle donc particulièrement propice pour examiner l'influence de la rétroaction sur la cognition de l'apprenant, c'est un milieu d'apprentissage riche en rétroactions verbales. Le contexte de l'atelier pratique impose toutefois des limites à l'efficacité de la rétroaction. L'apprenant est actif et n'est pas nécessairement disposé cognitivement à en recevoir. La pratique reliée à l'acquisition d'éléments de compétences procéduraux requiert une attention soutenue de la part de l'apprenant, pour sa sécurité entre autres (Andersson et al., 2014). Les rétroactions de l'enseignant se superposent aux informations déjà traitées par l'apprenant et n'ont pas toujours un impact visible sur la performance de celui-ci. Comment alors mesurer l'impact d'une rétroaction verbale sur la cognition de l'apprenant autrement que par des données comportementales et quel aspect de la cognition nous permet de mesurer cet effet ?

1.3 La charge cognitive et son incidence sur l'apprentissage

Il est établi que les rétroactions influencent la cognition de l'apprenant (Bangert-Drowns et al., 1991; Hatala et al., 2014; Mory, 2004). Le traitement cognitif de la rétroaction s'additionne à ce que l'apprenant manipule comme informations pour effectuer la tâche, la rétroaction impose donc une charge à l'apprenant, une charge cognitive. La théorie de la charge cognitive (TCC) de Sweller (1988) se situe à l'interface de l'architecture cognitive classique de Baddeley et Hitch (1974). Elle intègre les concepts d'une mémoire de travail (MDT) traitant des informations extérieures captées par nos sens (acquisition) et récupérant des informations provenant de notre mémoire à long terme (MLT), informations étant réactualisées en MDT (récupération). Selon la TCC, la charge cognitive (CC) est la charge induite à la (MDT) par un processus cognitif en réponse à un stimulus ou initié par la personne (Kalyuga, 2011). Dans cette théorie, l'environnement, la conception de l'activité pédagogique, la difficulté de la tâche et l'apprentissage, cognitivement défini comme un changement dans la MLT, imposent une charge à l'apprenant et cette charge aurait un impact positif ou négatif sur la capacité de l'apprenant à apprendre (Moreno, 2004; Sweller, 1988; Sweller et al., 1998). Donc, la charge perçue ne vient pas que de la tâche, mais aussi de l'apprenant qui évolue dans un environnement où il reçoit des rétroactions. La connaissance

de cet environnement et des phénomènes qui s’y produisent influence donc le nombre d’éléments à traiter par l’apprenant. Nous savons que les niveaux de rétroaction ont des effets différents sur la performance de l’apprenant (Hattie et Timperley, 2007; Van der Kleij et al., 2015). Certains auteurs considèrent que ces différences découlent du traitement cognitif induit par le niveau de rétroaction utilisé. Le niveau influencerait la charge cognitive de l’apprenant (Fyfe et al., 2015; Moreno, 2004; Shute, 2008; Stevenson, 2017), donc le nombre d’éléments à maintenir et à manipuler en MDT. Cependant, ces études mesurent la CC des apprenants à partir des questionnaires standardisés et non en temps réel, ce qui ne permet pas de mesurer l’impact de la rétroaction au moment où elle est émise. L’apport des neurosciences en ce qui a trait à la compréhension de la cognition est indéniable (Adolphs, 2003; Ansari et al., 2012; Eriksson et al., 2015; Howard-Jones et al., 2016; Sherman, 2006). Les méthodes de collectes de données novatrices permettent, à partir de modèles dynamiques de la cognition, de déduire certaines fonctions cognitives à partir d’activations cérébrales spécifiques.

La CC peut être visualisée comme étant le nombre d’éléments maintenus et manipulés en MDT en fonction du contexte d’apprentissage et cette charge peut être mesurée. Le contexte de l’atelier de cuisine engendre de multiples éléments traités simultanément. Il peut donc être difficile de distinguer l’effet de la rétroaction des autres éléments qui participent à la charge (Örün & Akbulut, 2019). Dans un tel environnement dynamique, la mesure de la CC représente donc un défi, surtout s’il est nécessaire de la mesurer en continu, de manière objective et à une haute fréquence afin d’obtenir des données temporelles fines référant aux processus cognitifs. L’électroencéphalogramme (EEG) est sensible aux manipulations cognitives requises pour traiter un stimulus et il est possible de différencier une charge faible d’une charge forte par exemple (Holm et al., 2009). Avec l’EEG nous pouvons donc observer, et parfois identifier, des processus cognitifs, des réseaux neuronaux pouvant être perçus grâce à l’électricité qu’ils produisent. L’EEG permet de faire des lectures à la milliseconde. Bien que très précises, ces lectures ne permettent pas de définir un processus cognitif complexe. Elles attestent une activité neuronale localisée, la fréquence de dépolarisation des neurones, en réaction à un stimulus (Demanuele et al., 2013; Heisz et McIntosh, 2013). Il devient donc possible de mesurer l’effet d’une rétroaction sur la cognition de l’apprenant au moment où la rétroaction est fournie et dans les secondes qui suivent. Toutefois, ce type de lecture demeure peu pertinent pour les enseignants en atelier, à moins de traiter les données à partir d’une théorie cognitive permettant d’obtenir une estimation du nombre d’éléments maintenu MDT. La TCC élaborée par Sweller (1988) permet d’affirmer qu’une charge cognitive haute correspond à une utilisation élevée de la mémoire de travail et qu’à l’inverse, lorsque la charge cognitive est basse, la

mémoire de travail a davantage de ressources pour traiter de l'information (Paas et Sweller, 2012). L'analyse des données provenant de l'EEG permettrait alors de déduire si la rétroaction augmente ou abaisse la charge cognitive de l'apprenant, donc si elle a un impact positif ou négatif sur le nombre d'éléments à traiter. La question se pose de savoir si la rétroaction, en offrant un niveau de complexité adapté, laisse suffisamment de ressources cognitives disponibles pour favoriser l'apprentissage de l'étudiant. En revanche, elle pourrait également s'avérer nuisible en monopolisant excessivement ces ressources, entraînant ainsi une charge cognitive qui entrave l'efficacité de l'apprentissage.

À l'instar de Gabrieli (2016), nous pouvons affirmer que les neurosciences éducationnelles tentent de comprendre les mécanismes cognitifs sous-jacents à l'apprentissage pour enrichir la recherche en sciences de l'éducation. Elles n'ont pas la prétention de révolutionner la manière dont les apprenants apprennent. Bien qu'occupant une certaine place dans les programmes universitaires en éducation, les résultats issus des neurosciences éducationnelles demeurent cependant peu utilisés en FPT au Québec. Il apparaît que les données obtenues par les recherches universitaires liant les pratiques pédagogiques utilisées en classe et les neurosciences éducationnelles n'atteignent pas la formation pratique, qu'elle soit professionnelle ou technique. Par ailleurs, ce phénomène n'est pas observable qu'en formation professionnelle, mais serait plutôt commun en sciences de l'éducation. Il y a donc lieu de se questionner sur cet aspect précis : comment accompagner l'apprenant en atelier pratique, tout en tenant compte de ce que les neurosciences indiquent comme facteurs favorisant l'apprentissage et l'acquisition de compétence ?

1.4 Problème de cette recherche

En formation professionnelle, notamment en atelier de cuisine, les apprenants utilisent diverses ressources internes et externes pour accomplir des tâches d'apprentissage. L'enseignant les guide à travers des rétroactions, ciblant différents niveaux de production (tâche, processus, autorégulation, et soi/affect). Les niveaux de rétroaction ont des effets différents sur l'apprentissage de l'apprenant (Hattie et Timperley, 2007; Van der Kleij et al., 2015), car le niveau de rétroaction serait un facteur influençant la charge cognitive de l'apprenant (Fyfe et al., 2015; Moreno, 2004; Shute, 2008; Stevenson, 2017). Par contre, les études établissant spécifiquement des liens entre le niveau de rétroaction et la charge cognitive de l'apprenant ont évalué celle-ci à partir de questionnaires autorapportés (Moreno, 2004) ou à l'aide de tests standardisés évaluant la MDT (Fyfe et al., 2015). Aucune de ces méthodes ne permet d'observer à un moment précis la charge cognitive de l'apprenant, donc l'impact direct de la rétroaction lorsque celle-ci est indexée précisément dans le temps. Par ailleurs, les études mesurant la charge cognitive au moyen

d'instrument précis, comme l'EEG, ne sont pas orientées vers l'effet des rétroactions et favorisent en général des milieux de recherche contrôlés et non des ateliers pratiques occasionnant une addition de facteurs influençant la CC (Demanuele et al., 2013; Holm et al., 2009; Ladouce et al., 2017). À notre connaissance, aucune étude n'a envisagé cette superposition de modèles, à savoir un bouclage entre les lectures psychophysiologiques et les impacts cognitifs des rétroactions.

1.5 Pertinence scientifique et sociale de cette recherche

La recension des différents écrits nous permet d'affirmer que le secteur de la formation professionnelle et technique, ancré dans un cadre universitaire de recherche, utilise actuellement peu de données des neurosciences éducationnelles et ne fait pas de recherche sous cet angle, alors que cette approche permet justement un fort ancrage dans ces contextes d'apprentissage dynamiques et centrés sur la pratique supervisée (Tan et al., 2023). Le contexte de cette recherche et la littérature s'y rattachant illustrent la nécessité d'opposer certaines positions scientifiques en lien avec l'apprentissage. Le manque de données temporelles fines (Anderson, 2002) pouvant être utilisées en formation professionnelle et en lien avec les facteurs cognitifs influençant l'apprentissage nous permet difficilement de documenter les liens entre l'effet des rétroactions et la cognition. Des lectures psychophysiologiques *in vivo* permettraient de nous renseigner sur la relation entre la MDT et les niveaux de rétroaction. Cette approche est cependant débattue. Certains chercheurs allèguent que les réponses comportementales sont le seuil minimal d'analyse permettant d'étudier des problématiques de recherche en sciences de l'éducation ayant un impact sur l'apprentissage, puisque ce seraient les seules pouvant être transférées dans la salle de classe (Bowers, 2016b; Bruer, 1997). Pourtant, les recherches des trente dernières années en lien avec l'efficacité des rétroactions en lien avec la performance, donc une réponse comportementale, n'arrivent que succinctement à expliquer pourquoi le tiers des rétroactions ont un impact négatif sur la performance (Hattie & Timperley, 2007; Kluger & DeNisi, 1996; Wisniewski et al., 2020). Des modérateurs influençant l'efficacité de la rétroaction sont certes identifiés, mais ne permettent pas de démontrer si le traitement cognitif de la rétroaction diffère en fonction de ceux-ci. La présente recherche tente de comprendre de façon plus précise les processus cognitifs inhérents au contexte d'apprentissage d'un métier. Ce contexte impose un milieu d'apprentissage complexe où le traitement de la rétroaction s'additionne à ce que l'apprenant doit déjà mobiliser comme ressources cognitives. Il est donc approprié d'y vérifier si certains niveaux de rétroaction augmentent ou diminuent la charge cognitive, et dans quelle mesure. L'atelier pratique fournit par ailleurs un contexte de recherche permettant d'examiner la cognition de l'apprenant dans un milieu éducatif écologiquement valide où des interactions naturelles se produisent. Finalement,

les conclusions découlant des principales recherches liant les niveaux de rétroaction et la charge cognitive proviennent de données ayant peu de précision temporelle (de Jong, 2010; Fyfe et al., 2015; Moreno, 2004), ce qui ne permet pas d'observer à un moment précis l'impact de la rétroaction sur la cognition de l'apprenant.

La réussite scolaire demeure un enjeu important et la Politique québécoise de la réussite éducative (2019) spécifie son caractère global, à tous les niveaux scolaires. L'atelier de cuisine permet un contexte social d'apprentissage où les rétroactions verbales sont particulièrement utilisées. Parmi les facteurs de réussite scolaire, les rétroactions de l'enseignant seraient un des facteurs positifs les plus influents (Hattie et Timperley, 2007). Il est donc pertinent d'associer quels niveaux de rétroaction donnent les meilleurs résultats pour les apprentissages des étudiants en cuisine. De plus, le rapport aux connaissances antérieures est particulièrement important en début de parcours (Fyfe et Rittle-Johnson, 2016; Kirschner et al., 2006; Tardif, 2007) et les rétroactions doivent viser des aspects précis de la tâche (Hatala et al., 2014; Sweller et al., 2019). De là l'importance de mettre en place des pratiques favorisant l'acquisition de nouvelles connaissances et leur application, plutôt que de complexifier davantage la régulation cognitive des apprenants en apprentissage. En définitive, cette recherche reste pragmatique, elle souhaite améliorer l'efficacité d'une action pédagogique intentionnelle permettant d'accompagner l'apprenant en atelier.

1.6 Question générale de recherche

Le contexte pratique de la formation professionnelle et l'état des connaissances des liens unissant les rétroactions et la cognition nous amène à énoncer la question de recherche suivante : de quelles façons la rétroaction utilisée en atelier pratique influence-t-elle la charge cognitive de l'apprenant en temps réel ?

CHAPITRE 2

CADRE THÉORIQUE

Dans ce chapitre, nous délimiterons le cadre nous permettant d'analyser l'objet de la présente recherche. Le concept de rétroaction sera défini historiquement et différentes définitions seront proposées. Nous présenterons ensuite une revue succincte des études s'intéressant aux effets des rétroactions sur la performance. À partir de différents modèles de rétroaction d'assises conceptuelles communes, nous comparerons différents types et niveaux de rétroaction, à différents moments, avec différentes populations et nous proposerons un modèle opérationnel pour analyser et catégoriser les rétroactions se produisant lors d'une situation d'apprentissage. Comme mentionné dans le chapitre précédent, ce sont les rétroactions verbales et immédiates durant un atelier pratique authentique qui seront analysées; le modèle retenu devra donc satisfaire aux exigences et contraintes d'une telle situation pédagogique.

Nous présenterons ensuite le concept de charge cognitive en éducation. Nous décrirons les facteurs influençant cette charge et les principales théories dominant ce champ de recherche. À travers différentes manières de mesurer la charge cognitive, nous établirons la pertinence des données psychophysologiques et l'apport des lectures psychophysologiques comme mesure de la charge cognitive. Les limites conceptuelles et empiriques seront abordées et confrontées au contexte de l'atelier pratique. Pour conclure, nous mettrons en relation les concepts de rétroaction et de charge cognitive afin de concevoir un cadre opérationnel à documenter et nous présenterons les objectifs de cette recherche.

2.1 Les rétroactions

2.1.1 Historique

Bien que le concept de rétroaction soit plutôt ancien, des écrits d'Hippocrate attestent son utilisation en formation au 4^e siècle av. J.-C. (Van De Ridder et al., 2008), les études sur la rétroaction sont apparues dans la littérature au début du 20^e siècle au sein du paradigme béhavioriste : la loi de l'effet de Thorndike stipulant qu'une rétroaction suivant une réponse augmente la récurrence de celle-ci et améliorerait l'apprentissage (1913, dans Mory 2004). Cette approche comportementaliste déterminait la rétroaction à partir de trois définitions :

- 1- La rétroaction est un facteur motivationnel pour augmenter la précision et la fréquence des réponses.
- 2- La rétroaction est un message renforçant de manière automatique la réponse au stimulus.
- 3- La rétroaction communique une information que l'apprenant peut utiliser pour valider ou changer une réponse ; elle doit insister sur les réponses erronées (Mory, 2004, p.746, notre traduction).

La rétroaction s'est imposée pendant près d'un siècle comme un facteur de réussite puissant, conditionnant la manifestation de comportements désirés. Pourtant, Kluger et DeNisi (1996) relevèrent que plusieurs études antérieures présentaient des lacunes méthodologiques et expérimentales ou comportaient des enjeux éthiques ; leur méta-analyse, tout comme celle de Bangert-Drowns et collègues (1991), laisse entrevoir que les résultats de performance associés à l'utilisation de rétroactions ne sont pas que positifs : plus du tiers des rétroactions auraient un impact nul ou négatif sur l'apprentissage. Plusieurs études actuelles corroborent le caractère équivoque de l'effet des rétroactions (Fyfe et al., 2015; Hatala et al., 2014; Hattie et Timperley, 2007; Moreno, 2004; Van der Kleij et al., 2015).

2.1.2 Définitions

La rétroaction est un concept large prenant des significations différentes selon les disciplines dans lesquelles elle opère. La présente recherche se faisant en contexte scolaire, *Le Dictionnaire actuel de l'éducation* (Legendre, 2005) est pertinent et propose une définition détaillée des rétroactions se produisant entre un enseignant et un élève. En partant d'une définition générale, la rétroaction comme une « Communication d'informations qu'une personne reçoit suite à ses actions, à ses attitudes, à ses comportements. » (2005, p. 1193), Legendre définit entre autres le concept d'un point de vue pédagogique : « Information, évaluation, réponse fournie par l'Agent au Sujet suite à une période d'apprentissage. » ; curriculaire : « Retour sur des objets d'études antérieurs à titre de renforcement, de consolidation ou d'apprentissage. » ; communicationnel : « Réaction verbale ou non verbale du récepteur envers l'émetteur qui informe ce dernier de la nature, de la qualité et de l'effet de son message. » ; et technologique: « Dans un enseignement programmé, information fournie au Sujet, à la suite d'une réponse, dans le but de corriger une erreur ou de renforcer son cheminement d'apprentissage. » (*Ibid.*). Il apparaît que malgré ses sous-composantes disciplinaires, la rétroaction est définie comme une action pédagogique initiée par l'enseignant pour réguler une action de l'apprenant, permettant à celui-ci de transformer une conception initiale. Cela va dans le sens de l'*Oxford Dictionary of Education* (Wallace et Oxford University Press, 2015) qui affirme que « ... la rétroaction réfère à la réponse formelle de

l'enseignant à l'apprenant à propos d'un apprentissage. Écrite ou verbale, la rétroaction inclut des informations sur ce qui peut être amélioré ou encore elle met en relief les acquis de l'étudiant. » (2015, p.127, notre traduction). Sur la nature de la rétroaction, écrite ou verbale, Ross (1988, dans Legendre 2005) et Shute (2008) indiquent un effet positif des rétroactions écrites par rapport aux rétroactions verbales, ce qui n'est pas confirmé par l'étude de Buckley (2012) et par la méta-analyse de Wisniewski et collègues (2020) ; cela semble toutefois attester de la pertinence de développer des rétroactions verbales significatives pour les apprenants. *L'American Educators Encyclopedia* (Dejnozka et al., 1991) indique quant à lui quatre facteurs nécessaires pour que la rétroaction soit valide :

1. L'information est requise par un organisme (A), mais est générée par un autre (B);
2. L'information doit être reçue par l'organisme (A);
3. L'information doit être traitée par l'organisme (A);
4. L'information est produite (B) pour initier une réaction (A). Le fait de réagir ou non à la rétroaction est une réaction. (1991, p. 204, notre traduction)

Kluger et DeNisi mettent l'enseignant en premier plan, la rétroaction étant « les actions prises par un agent externe pour fournir de l'information à propos d'un aspect (de la performance) d'une tâche. » (1996, p. 255, notre traduction), mais omettent d'inclure l'apprenant. La méta-analyse de Van der Kleij (2015), tout comme l'étude de Fyfe (2015), utilise plutôt la définition de Mory, à savoir « tout type d'information concernant la performance ou la compréhension d'un objectif que l'apprenant peut utiliser pour confirmer, rejeter ou modifier une connaissance préalable. » (2004, p. 745, notre traduction). Cette définition ne tient pas compte du rôle de l'enseignant, mais conçoit la rétroaction comme une réaction de l'apprenant à un stimulus impactant la conception première de l'apprenant. Hattie et Timperley évoquent plutôt la rétroaction comme « l'information fournie par un agent (enseignant, étudiant, expérience ...) à propos d'un aspect de la performance du sujet ou de sa compréhension. » (2007, p. 81, notre traduction). Cette définition détermine un caractère bidirectionnel à la rétroaction, mais toujours en réaction à une performance.

Nous pouvons constater que les définitions, bien que diverses, regroupent des éléments essentiels déterminants ce qu'est ou devrait être une rétroaction. Il est intéressant de remarquer que les définitions actuelles se rapprochent des trois axes définis par l'approche behavioriste du siècle dernier. En effet, l'idée que la rétroaction doit donner à celui qui la reçoit une information lui permettant de valider ou non une

performance reste une composante importante de la rétroaction (Hattie et Timperley, 2007; Kluger et DeNisi, 1996; Mory, 2004; Wallace et Oxford University Press, 2015). Toutefois, nous croyons, comme l'*American Educators Encyclopedia* (Dejnozka et al., 1991), que la rétroaction doit être intentionnelle, elle est initiée par l'un ou l'autre des acteurs pédagogiques en réaction à une performance. Afin de respecter les caractéristiques de la population étudiée, des étudiants novices, et de conserver le caractère actif du contexte de réalisation en formation professionnelle et la prédominance de rétroactions verbales en atelier, la définition que nous proposons est la suivante :

Au cours d'une tâche d'apprentissage, la rétroaction verbale est l'information fournie à l'apprenant par l'enseignant, à la suite d'une action délibérée ou non, ayant pour but de confirmer, rejeter ou modifier une action préalable.

2.1.3 Effets des rétroactions sur la performance

La recherche s'intéresse depuis les années 1990 à la compréhension des phénomènes éducatifs en lien avec les types et niveaux de rétroaction utilisés. Toutefois, les données portent davantage sur les gains de performance que sur une théorisation de l'effet des rétroactions en lien avec la performance (Buckley, 2012; Mory, 2004). Plutôt que d'utiliser l'échelle conventionnelle de Cohen pour déterminer la force de la taille d'effet (Rice et Harris, 2005), nous utiliserons le barème de Hattie (2012) qui détermine une valeur de $d \geq 0,40$ comme seuil critique pour que l'effet soit désirable. Un d sous ce seuil ne produit pas assez d'effet lui permettant d'être distingué des autres effets interagissant lors d'une situation pédagogique.

Comme le rapportent Kluger et DeNisi (1996), les rétroactions n'ont pas que des effets positifs sur l'apprentissage, leur méta-analyse établit une taille d'effet positive modérée ($d = 0,41$) et met en lumière qu'une rétroaction s'éloignant des détails de la tâche à effectuer diminue la performance. Pour Hattie et Timperley (2007), les rétroactions ont une taille d'effet importante ($d = 0,79$), leur méta-analyse révèle aussi une variabilité importante quant aux niveaux de rétroaction utilisés. Afin de mieux prendre en compte l'hétérogénéité des différents modérateurs, une méta-analyse fut subséquentement conduite par Wisniewski, Zierer et Hattie (2020) et elle indique une taille d'effet modérée ($d = 0,48$), soulignant ainsi l'apport de différents modérateurs : les rétroactions seraient plus bénéfiques lorsqu'elles visent un résultat cognitif ou physique plutôt que motivationnel ou comportemental. La méta-analyse de Hatala et collègues (2013) ne s'intéresse qu'aux performances obtenues en simulation pratique d'apprentissage de la médecine (*SBME*), elle s'intéresse donc à l'acquisition de compétences procédurales et obtient des résultats similaires, avec un effet significatif ($d = 0,74$) en faveur des rétroactions, plutôt qu'en absence de

celles-ci. La méta-analyse conduite par Van Der Kleij (2015) poursuit dans ce sens, mais en évaluant que les performances issues d'apprentissages en environnement informatique. Dans leur analyse, les tailles d'effet varient considérablement selon les niveaux de rétroactions ($d= 0,05$ à $d= 0,46$). Ces résultats nous poussent à examiner davantage la relation entre le niveau de rétroaction utilisé et l'effet sur la performance.

Depuis la loi de l'effet de Thorndike (1913, dans Mory 2004) et la dominance behavioriste, si les savoirs, connaissances et pratiques pédagogiques liés aux rétroactions ont évolué en parallèle de la recherche, les modèles et la typologie utilisée par les auteurs aussi. Il devient nécessaire de se doter d'un cadre nous permettant de comparer les résultats des différentes études. Nous présenterons différents niveaux de rétroaction issus de notre recension d'écrits, puis nous analyserons les effets des rétroactions en fonction du niveau de rétroaction utilisé, du niveau d'expertise du sujet, de la complexité de la tâche et du moment où la rétroaction est donnée.

2.1.3.1 Modèles et niveaux de rétroaction

Puisque la dénomination des niveaux de rétroaction diffère parfois d'une étude à l'autre, il devient périlleux de comparer les études entre elles. Nous regrouperons dans cette section les niveaux de rétroaction en fonction des modèles et définitions utilisés par les auteurs afin d'établir un cadre synthétisant les effets des différents niveaux de rétroaction sur l'apprentissage en fonction des études utilisant ces modèles, permettant ainsi la comparaison des résultats.

Certains modèles pertinents ont été écartés, car désuets par rapport aux modèles qu'ils ont engendrés (modèle cognitiviste de Bangert-Drowns et collègues, 1991), ou difficiles à utiliser dans le contexte de la présente étude : modèle de Mason et Bruning (2001) pour environnement informatique et modèle centré sur l'apprenant PROMPTED de Rudland et collègues (2013) difficilement utilisable en atelier. Les deux modèles suivants ont été choisis, car la littérature scientifique les supportant est riche et diversifiée ; les études les utilisant ont fait ressortir des résultats empiriques parfois équivoques servant de base à la présente étude. Délaissant le modèle behavioriste traditionnel, ces modèles de rétroaction s'intéressent davantage à la cognition de l'apprenant, donc sur l'impact cognitif de celle-ci, rejetant en partie un modèle de rétroaction stimulus/réponse et opérant plutôt dans un cadre cognitiviste classique où le traitement de l'information découle de la dynamique entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme (voir Atkinson et Shiffrin, 1968 et Baddeley et Hitch, 1974).

2.1.3.2 Le modèle KR-KCR-EF

Élaboré par Dempsey, Driscoll et Swindell (1993), ce modèle attribue une fonction cognitive, métacognitive et motivationnelle à la rétroaction (Narciss et Huth, 2002). Il propose trois niveaux de rétroactions donnés à l'apprenant. Le premier niveau, la connaissance du résultat - *knowledge of result* (KR) -, est une rétroaction dichotomique. L'enseignant offre à l'apprenant une indication quant à la conformité du résultat, sans pour autant lui fournir la réponse correcte en cas d'erreur. Le deuxième niveau, la connaissance du bon résultat - *knowledge of correct result* (KCR) -, fonctionne de manière similaire, mais fournit la bonne réponse en cas d'erreur. Enfin, le troisième niveau, la rétroaction élaborée ou explicative - *elaborated feedback* (EF)-, explique à l'étudiant les raisons de son résultat. Ce niveau de rétroaction fournit davantage d'informations à l'apprenant pour corriger ses erreurs, mais n'impliquerait pas pour autant un traitement cognitif plus important (Moreno, 2004). Utilisé dans la méta-analyse de Van der Kleij et collègues (2013), dans un contexte d'apprentissage en environnement informatique, les tailles d'effets (*d*) étaient respectivement de 0,05 pour le KR, 0,32 pour le KCR et 0,49 pour l'EF. En revanche, cette méta-analyse ne prend pas en compte le degré d'expertise disciplinaire des apprenants, ce qui n'est pas sans conséquence pour l'interprétation que nous pouvons faire de ces résultats puisque le niveau d'expertise de l'apprenant modère l'effet de la rétroaction (Fyfe et Rittle-Johnson, 2016; Kalyuga, 2007). De plus, ce modèle est principalement utilisé pour déterminer des rétroactions en fonction des réponses de l'étudiant (Mason et Bruning, 2001; Mory, 2004; Van der Kleij et al., 2015), ce qui permet un contrôle expérimental, mais reste peu pertinent dans le contexte de la présente étude, qui étudie l'effet des rétroactions verbales données par l'enseignant à l'apprenant et non celle d'un programme exécutant des rétroactions prédéterminées en fonction des réponses de l'utilisateur.

2.1.3.3 Le modèle de rétroaction efficace de Hattie et Timperley

Pour Hattie et Timperley (2007), le but d'une rétroaction est de réduire l'écart entre ce qui est compris/produit par l'apprenant et ce qui souhaité par l'enseignant. Une rétroaction efficace doit d'abord permettre à l'étudiant de répondre à trois questions : où est-ce que je m'en vais (buts), comment est-ce que je le fais (qualité), et qu'est-ce que je fais ensuite (anticipation). Cette assise théorique, adaptée du cycle d'autorégulation de Zimmerman (2000), opère grâce à quatre niveaux de rétroaction : rétroaction sur la tâche, rétroaction sur le processus, rétroaction sur l'autorégulation et rétroaction sur le soi/affect (RS). Hattie et Timperley mentionnent des niveaux plutôt que des types, mais la différence entre les deux semble plus sémantique que conceptuelle (Van der Kleij et al., 2015). La rétroaction sur la tâche (RT)

informe l'apprenant sur le niveau atteint, c'est une rétroaction corrective et environ 90% des rétroactions verbales données par l'enseignant viseraient ce niveau (Hattie et Timperley, 2007).

La rétroaction sur le processus (RP) est plus spécifique aux actions sous-tendant la tâche à effectuer. C'est un accompagnement encourageant les stratégies de détection d'erreurs durant la production, ou encore la recherche d'une aide extérieure pour valider une composante de la tâche. Tout comme la rétroaction élaborée (EF), la RP serait plus efficace que la connaissance du résultat (KR) pour les apprentissages complexes (Hattie et Timperley, 2007).

La rétroaction sur l'autorégulation (RA) maintient l'engagement de l'apprenant à réaliser la tâche, c'est une rétroaction qui souhaite initier l'activation de mécanismes d'auto-évaluation chez l'apprenant afin que celui-ci puisse déterminer par lui-même les contradictions entre sa production et le résultat attendu, ce qui n'est pas sans rappeler certaines stratégies métacognitives, comme la cueillette autonome d'informations relatives à la tâche à effectuer (Bégin, 2008; Tardif, 2007). C'est une rétroaction complexe, conceptuellement semblable à l'EF (Van der Kleij et al., 2012), elle serait le niveau de rétroaction le plus efficace pour les apprentissages simples ou complexes, mais l'intégration des niveaux précédents (rétroactions sur la tâche et le processus) semble nécessaire et l'apprenant n'est pas toujours en mesure de recevoir ce niveau de rétroaction (Kluger et DeNisi, 1996). De plus, ce niveau de rétroaction est celui qui se produirait le moins souvent en situation réelle d'apprentissage, moins de 2 % des rétroactions (Brooks et al., 2019; Gan, 2011) seraient des RA.

Finalement, la rétroaction sur le soi (RS) est utilisée dans plusieurs situations pédagogiques à la place d'une RT, RP ou RA, mais serait peu efficace. Selon Kluger et DeNisi (1996) et Hattie et Timperley (2007), une rétroaction louangeant ou critiquant un comportement de l'apprenant plutôt qu'un aspect de la tâche, « Bel effort » par exemple, n'apporterait d'effet positif que si elle sert de levier motivationnel chez l'apprenant, sinon, une rétroaction personnelle ou affective aurait moins d'impact ($d = 0,09$) que l'absence de celle-ci ($d = 0,34$). Il faut toutefois distinguer une RS qui dirige l'attention de l'apprenant hors de la tâche, « Tu fais n'importe quoi ! », d'une RS qui évalue la qualité d'un aspect de la tâche, donc jumelée à une autre forme de rétroaction, « Bien joué, tu as disposé ton poste de travail de façon à... », intégrant ainsi deux niveaux de rétroactions, RP et RS par exemple. Cette situation n'est possible qu'avec l'intégration d'une RS avec un autre niveau (RT, RP et RA), les autres niveaux étant exclusifs entre eux, c'est-à-dire qu'une rétroaction jumelant une RT et une RP serait en fait deux rétroactions successives. Le

tableau 2.1 propose des exemples de rétroaction pouvant se produire en atelier pratique et théorique d'une formation en cuisine.

Tableau 2.1 Exemple des niveaux de rétroaction pouvant être donnés à un apprenant

Niveaux			
Rétroaction sur la tâche	Rétroaction sur le processus	Rétroaction sur l'autorégulation	Rétroaction sur le soi/affect
Cette soupe manque d'assaisonnement, elle est aqueuse.	Tu dois suer davantage les légumes pour retenir leurs saveurs.	Goûte à la soupe à différents moments de la recette, tu pourras plus facilement ajuster...	Ce n'est pas ta meilleure journée on dirait...
Tu as très bien réussi ta cuisson.	Tu vois l'absence de dégradé ? C'est signe d'un bon temps de repos après cuisson.	Est-ce que tu penses qu'une pièce plus grasse réagirait de la même manière ?	Tu es une des meilleures du groupe !

2.1.3.4 Niveau d'expertise de l'apprenant relativement à l'objet d'apprentissage

L'effet de la rétroaction sur la performance serait aussi influencé par le niveau d'expertise du sujet (Fyfe et Rittle-Johnson, 2016; Hattie et Timperley, 2007; Kalyuga, 2007). Il apparaît qu'un type ou un niveau de rétroaction peut avoir des effets négatifs ou positifs sur la performance des apprenants, le rapport aux connaissances antérieures jouant un rôle de modérateur (Fyfe et Rittle-Johnson, 2016; Moreno, 2004; Moreno et Mayer, 2005). D'après Moreno (2004), les rétroactions sur le processus favoriseraient davantage les apprentissages que les rétroactions sur la tâche pour des apprenants novices évoluant dans un environnement multimédia ; les sujets ayant reçu les rétroactions sur la tâche ont aussi perçu l'activité d'apprentissage comme étant plus difficile. Les données recueillies par Fyfe et Rittle-Johnson (2016) mentionnent que les rétroactions sur la tâche ont un effet bénéfique pour l'apprentissage des mathématiques chez les novices en opposition à l'absence de rétroaction. Le design de leur expérimentation n'a pas inclus de rétroaction sur le processus, mais les chercheuses ont soulevé un enjeu de taille. Elles ont démontré que l'apprentissage d'une stratégie de résolution de problème provoquait un effet de renversement, c'est-à-dire que la rétroaction sur la tâche avait un effet positif sur l'apprentissage

chez les novices, mais négatif chez les novices ayant appris une stratégie en lien avec la façon de résoudre le problème présenté. Les stratégies ont été exposées aux apprenants avant la tâche, en présentant la meilleure façon d'appréhender le problème à résoudre, donc en explicitant les processus permettant de réussir la tâche. Cet aspect semble indiquer qu'indépendamment du niveau de connaissances antérieures, d'autres facteurs modèrent l'efficacité de la rétroaction chez le novice. L'*expertise reversal effect* (Kalyuga et al., 2007) que l'on peut traduire par « effet de renversement dû à l'expertise » (Bara et Tricot, 2017, p.21) permet d'expliquer en partie ces résultats ; ce principe stipule que ce qu'une stratégie pédagogique qui fonctionne pour un novice peut avoir l'effet inverse chez un expert. Ce concept sera repris dans la deuxième partie du cadre théorique traitant du concept de charge cognitive.

Il importe de revenir sur ces deux études. Moreno (2004) affirme que les rétroactions sur la tâche entravent l'apprentissage du novice (la performance au posttest dans ce cas-ci), car l'apprenant doit trouver par lui-même les causes de son résultat, ce qui a pour effet de complexifier inutilement les opérations mentales d'encodage et de récupération d'information en MDT. Les rétroactions sur le processus informent quant à elles l'apprenant sur les étapes ou les manipulations qui l'ont amené à produire tel ou tel résultat. Elles permettent à l'apprenant de comprendre d'où proviennent les écarts entre son résultat et ce qui est attendu, permettant ainsi à l'apprenant de cibler un aspect précis de sa production et de simplifier l'encodage et la récupération d'information en MDT. Fyfe et Rittle-Johnson (2016) affirment pour leur part que les rétroactions sur la tâche améliorent les apprentissages chez les apprenants novices n'ayant pas appris préalablement de stratégie pour résoudre le problème présenté. N'ayant pas fourni de rétroactions complexes (rétroaction sur le processus ou l'autorégulation) aux apprenants, nous ne pouvons vérifier l'impact d'une rétroaction visant ce niveau chez l'apprenant novice ayant reçu ou non une stratégie, à savoir si les apprenants obtiendraient de meilleurs résultats qu'avec les rétroactions sur la tâche. Toutefois, il semble y avoir un point de bascule qui témoigne du développement de l'expertise : le moment où les rétroactions sur la tâche produisent l'effet contraire. En complément de la présente recherche, des recherches supplémentaires devront se pencher sur cet aspect qui ouvre la porte à une meilleure compréhension du développement de l'expertise chez le novice.

2.1.3.5 Moment de la rétroaction et complexité de la tâche

Le moment où la rétroaction est donnée est un sujet largement étudié (Archer, 2010; Clariana et al., 2000; Hattie et Timperley, 2007; Mory, 2004; Shute, 2008; van der Kleij et al., 2012), pourtant, les résultats sont bien souvent contradictoires, car aucun cadre temporel commun ne semble être utilisé (Mory, 2004; Van

der Kleij et al., 2015). En effet, est-ce qu'une rétroaction verbale est immédiate lorsqu'elle est donnée au moment de l'observation ou dans les minutes qui suivent ? Est-ce qu'une rétroaction peut être trop différée ? Certaines analyses nous permettent toutefois de documenter cet aspect, même si le lien entre le moment de la rétroaction et son effet reste flou (Shute, 2008).

D'après Hattie et Timperley (2007), les rétroactions immédiates seraient davantage bénéfiques lorsqu'elles portent sur la tâche (RT), alors que les rétroactions RP et RA peuvent être différées. Concernant la complexité de l'apprentissage, il serait préférable de donner une rétroaction différée pour un apprentissage simple et immédiate lors d'un apprentissage complexe (Archer, 2010; Clariana et al., 2000). Cette relation est évoquée dans la méta-analyse de Hatala (2014) : les rétroactions visant des apprentissages complexes seraient davantage bénéfiques lorsqu'elles sont données de manière concurrente durant une tâche d'apprentissage, donc immédiates, alors que les rétroactions portant sur des apprentissages simples auraient plus d'impact lorsqu'elles sont différées. L'hypothèse du guidage (Schmidt, 1991) s'intéresse à l'apprentissage de compétences procédurales. Elle stipule que lors d'un apprentissage moteur, des rétroactions constantes, donc concurrentes, peuvent créer un excès de confiance en la rétroaction chez l'apprenant, qui se manifeste par une baisse de performance lorsqu'elle est retirée (Hatala et al., 2014). Une rétroaction élaborée à la fin l'activité d'apprentissage, donc terminale, serait ainsi davantage bénéfique pour les apprentissages simples alors que les rétroactions concurrentes seraient bénéfiques pour les apprentissages complexes. L'hypothèse du guidage (Schmidt, 1991) n'entre pas en contradiction avec les conclusions de Hattie et Timperley (2007), nous pourrions résumer que lors d'un apprentissage de compétences procédurales, les RT immédiates sont bénéfiques pour les apprentissages complexes (rétroactions soutenues lors des différentes étapes de la tâche), alors que les RP et les RA peuvent être données à la fin d'un apprentissage simple, évitant ainsi de détourner l'attention de l'apprenant lors de l'exécution de la tâche ou de créer un excès de confiance envers les rétroactions de l'enseignant. Hattie et Timperley (2007) soulignent aussi que les rétroactions (RT, RP et RA) ont davantage d'impacts positifs pour les apprentissages simples que complexes.

Il semble donc exister une relation entre le niveau de rétroaction, la complexité de l'apprentissage et le moment où la rétroaction est donnée. Cette relation demeure ardue à démontrer, particulièrement à cause de la difficulté à définir le moment où une rétroaction n'est plus immédiate, qu'elle devient différée (Archer, 2010). Toutefois, plusieurs auteurs suggèrent qu'il est préférable de donner des rétroactions immédiates (Anderson, 2002; Hattie et Timperley, 2007; Kluger et DeNisi, 1996; Mory, 2004; Van der Kleij

et al., 2015), même si les gains pour les apprentissages complexes sont davantage supportés par des rétroactions différées, de niveau RP ou RA.

Nous pouvons constater que la relation entre le niveau de rétroaction et la cognition demeure floue, plusieurs variables modifient l'impact du niveau de rétroaction sur la performance. La performance dépend en partie du niveau de rétroaction, mais le niveau d'expertise du sujet, la complexité de l'apprentissage et le moment de la rétroaction modèrent son action. Le tableau 2.2 qui suit synthétise l'effet des niveaux de rétroaction sur la performance, tout en incluant l'influence des trois principaux modérateurs que nous avons ciblés.

Tableau 2.2 Effets des niveaux de rétroaction sur l'apprentissage en fonction du niveau d'expertise, de la complexité de l'apprentissage et du moment où elles sont données

Rétroaction	Effets sur l'apprentissage					
	Niveau d'expertise		Complexité		Moment	
	Novice	Expert	Simple	Complexe	Immédiate	Différée
Niveaux						
Tâche	- +	-	+	+	+	-
Processus	+	+	+	-	-	+
Autorégulation	n.d.	n.d.	+	-	-	+

Il apparaît que les résultats contradictoires se situent avec la RT chez l'apprenant novice. Si l'effet de renversement dû à l'expertise (Kalyuga, 2007) peut expliquer certaines différences de performances, la relation entre le niveau de rétroaction et la performance d'apprenant novice doit être documentée davantage, particulièrement en situation d'apprentissage formel. Il devient alors nécessaire de se doter d'un modèle nous permettant d'identifier quels niveaux de rétroaction sont utilisés par l'enseignant lors d'une situation d'apprentissage authentique. Afin de catégoriser correctement les niveaux de rétroaction que nous étudierons en atelier, nous utiliserons le modèle de Hattie et Timperley (2007).

2.1.4 Modèle opérationnel de la recherche

Différents modèles de rétroactions sont utilisés pour évaluer l'effet d'un niveau de rétroaction sur l'apprentissage. Toutefois, ces modèles servent principalement à comparer les niveaux entre eux, ils offrent peu de possibilités d'analyse de pratique. Le modèle de Hattie et Timperley (2007) est un modèle

opérationnel descriptif permettant d'associer une rétroaction faite dans un cadre scolaire réel à un niveau de rétroaction précis. Il permet d'appréhender la relation entre la rétroaction et l'apprentissage du point de vue de l'étudiant, en mettant l'accent sur la façon dont celui-ci la reçoit et non pas qu'en fonction de celui qui l'émet, l'enseignant (Brooks et al., 2019).

Ce modèle a été utilisé avec succès dans différentes études s'intéressant aux niveaux de rétroaction opérant naturellement en classe (Brooks et al., 2019; Brown et al., 2012; Gan, 2011; Harris et al., 2015), permettant ainsi de documenter les rétroactions données et reçues en classe. La figure 2.1 présente le modèle de rétroaction efficace selon Hattie et Timperley (2007).

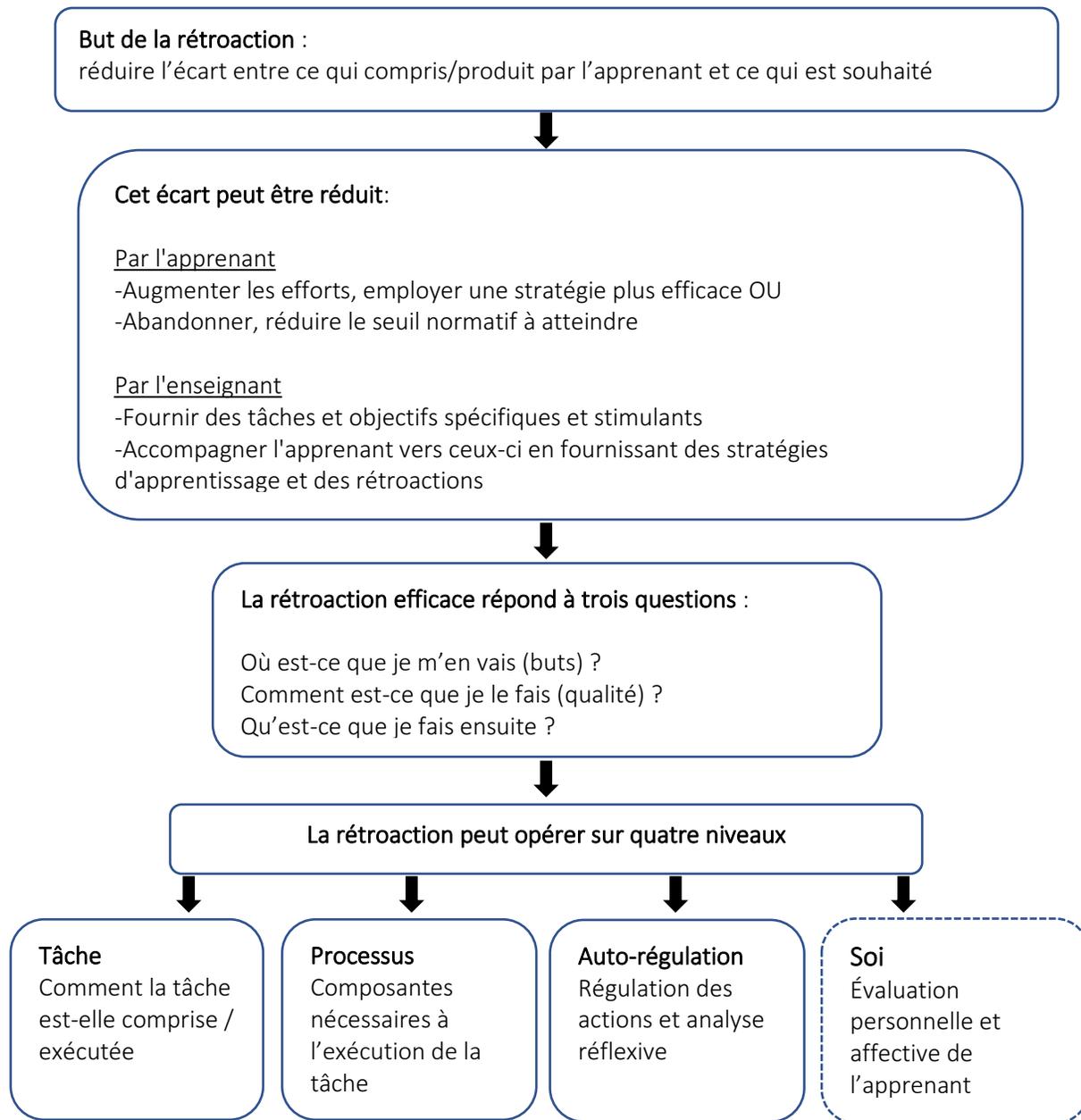


Figure 2.1 Le modèle de rétroaction opérant sur quatre niveaux, adapté de Hattie et Timperley (2007, p.87)

La première étape consiste en un retour sur l'action de l'apprenant, le but de la rétroaction étant de réduire l'écart entre ce qui est produit par l'apprenant et ce que l'enseignant conçoit comme étant professionnellement adéquat dans notre cas. La rétroaction n'est pas une consigne, si l'apprenant ne comprend pas la tâche à effectuer, une rétroaction aura peu d'utilité. L'apprenant peut évaluer lui-même

sa production ou arriver dans une impasse et demander une rétroaction ; à l'inverse, elle peut provenir directement de l'enseignant qui a observé un geste, une pratique, une production se détournant du caractère normatif attendu. Que la rétroaction soit initiée par l'apprenant ou l'enseignant, une rétroaction efficace devra, selon Hattie et Timperley (2007), répondre à au moins une des trois questions suivantes pour l'apprenant : où est-ce que je m'en vais (buts), comment est-ce que je le fais (qualité), qu'est-ce que je fais ensuite (anticipation) ? Il importe de préciser que ces questions ne réfèrent pas à un type ou un niveau de rétroaction spécifique, elles visent à cibler un aspect de la tâche qui permet à l'apprenant de poursuivre en étant conscient que sa production est adéquate, qu'elle est produite de la façon prescrite et qu'elle lui permet de continuer vers une nouvelle étape préalablement spécifiée. Les niveaux de rétroaction de Hattie et Timperley (2007) opèrent sur quatre niveaux et permettent de répondre à ces trois questions.

Il apparaît toutefois que l'impact des rétroactions sur la performance demeure un enjeu dans le modèle de Hattie et Timperley (2007). En effet, lorsque l'impact est positif, nous pouvons déduire que le niveau de rétroaction ciblé permet de clarifier certains enjeux de la tâche pour l'apprenant, donc que la rétroaction réduit l'écart entre ce qui est et ce qui doit être. Cependant, l'effet nul ou négatif de la rétroaction demeure exploratoire ; nous pouvons difficilement expliquer pourquoi une rétroaction qui ne cible pas le bon niveau n'aide pas à réduire l'écart entre ce qui est produit/compris par l'apprenant et ce qui est souhaité par l'enseignant, les hypothèses demeurent empiriquement difficiles à vérifier (Hattie et Timperley, 2007; Kluger et DeNisi, 1996; Shute, 2008). La charge cognitive peut tenter d'expliquer cette relation ambiguë.

2.2 La charge cognitive

2.2.1 Historique

La révolution cognitive, en opposition au paradigme béhavioriste, suivant la Seconde Guerre mondiale pave la voie aux sciences cognitives (Varela et al., 1993), les théories et modèles qui en émergent permettent d'appréhender davantage comment le vivant perçoit, traite et par extension, conçoit le monde dans lequel il évolue. La théorie de la charge cognitive (TCC) est héritière de ce changement paradigmatique et apparaît au courant des années 1980, ses fondements remontant aux premiers modèles cognitivistes de la cognition (Miller, 1956).

S'appuyant sur un modèle computationnel, Sweller (1988) démontre que le design éducatif influence le nombre d'éléments à traiter simultanément dans la mémoire de travail, les choix pédagogiques induisent ainsi une certaine charge à l'apprenant. L'ébauche de cette théorie permet alors d'appliquer théoriquement, puis empiriquement, aux sciences de l'éducation des construits théoriques de la psychologie cognitive en liant un modèle d'apprentissage cognitiviste (Atkinson et Shiffrin, 1968; Baddeley et Hitch, 1974) à la conception de situations éducatives (Sweller et Chandler, 1994). La TCC prend ensuite de l'ampleur, jusqu'à devenir un des sujets de recherche les plus cités en éducation (de Jong, 2010; Ozcinar, 2009). La TCC a évolué : elle ne s'attarde plus qu'au design éducatif, son champ d'application permettant certes d'étudier des objets de recherche liés à l'apprentissage et à l'éducation, mais aussi aux fonctions exécutives (Demanele et al., 2013; Scharinger et al., 2017), dont l'attention (Holm et al., 2009) et la prise de décision (Olschewski et al., 2018).

2.2.2 Définitions

La théorie de la charge cognitive (TCC) est directement liée à la manière dont nous traitons l'information, plus particulièrement l'impact qu'a ce traitement sur notre mémoire de travail. Notre intention n'est pas de faire une recension exhaustive des théories symboliques, connexionnistes et hybrides de la cognition, mais plutôt de définir certains concepts clés entourant les capacités cognitives limitées impliquées dans l'apprentissage, permettant ainsi un dialogue entre les sciences de l'éducation et certaines disciplines contributives étant sollicitées dans ce projet. Puisque la TCC tire ses racines de la psychologie cognitive, nous déterminerons dans un premier temps certains concepts nécessaires pour l'appréhender.

2.2.2.1 Mémoire de travail et mémoire à long terme

Le concept de mémoire est protéiforme, il se définit par le paradigme et la discipline qui l'observe. Nous nous intéressons à la mémoire humaine comme matrice indissociable de l'apprentissage : pour apprendre, un changement dans notre mémoire doit se produire (Kirschner et al., 2006). Le modèle cognitiviste d'Atkinson et Shiffrin (1968) pose les bases de deux concepts fondamentaux pour définir la charge cognitive : la mémoire de travail (MDT) et la mémoire à long terme (MLT).

La MDT, selon Eriksson et collègues (2015), permet de maintenir pendant quelques instants (secondes) des informations sans contribution sensorielle additionnelle, donc sans rappel de l'information. Ces informations demeurent accessibles pour être traitées, que l'information soit perçue de manière consciente ou non. Baddeley (2012) distingue la MDT de la mémoire à court terme (MCT), même si ces

deux concepts réfèrent parfois à la même composante dans la littérature : la MCT est un espace temporaire de maintien de l'information, alors que la MDT, bien que succédant au concept de MCT et l'englobant, combine quant à elle le maintien, mais surtout la possibilité de manipuler l'information selon sa nature. Le modèle de Baddeley et Hitch (1974) différencie par exemple l'information visuelle (calepin visuospatial) et auditive (boucle phonologique). Chaque système maintient l'information et la met en relation avec ce qui est emmagasiné dans la MLT.

La MDT est limitée en temps, mais aussi en nombre d'éléments pouvant y être maintenus. Si Miller (1956) se disait persécuté par le nombre $7 (\pm 2)$, les recherches actuelles pointent davantage vers un stockage de 4 ± 1 informations pouvant être maintenue et manipulée en fonction des représentations existantes dans la MDT (Eriksson et al., 2015), représentations que Sweller (1988) nomme les schémas mentaux. Cette capacité limitée demeure un obstacle, mais la régulation entre la MDT et la MLT permet de réduire cette limite par l'apprentissage. Les informations peuvent être agglomérées, donc trois informations reliées peuvent être fusionnées en une seule, comme lorsque nous mémorisons un numéro de téléphone en regroupant les nombres. Un schéma complexe ne prenant pas plus d'espace dans la MDT qu'un schéma simple (Sweller, 1988).

La MLT est quant à elle l'assise de tout ce que nous connaissons. Sa définition est moins équivoque que celle de la MDT (A. Baddeley, 2012; Cowan, 2008) : nous pourrions affirmer sans trop d'ambiguïté que la MLT est un « stockage de l'information relativement permanent, ne nécessitant pas de répétition continue. » (Bear et al., 2005, p.865) ou comme le dit Cowan, « un entrepôt de connaissances, un enregistrement d'évènements antérieurs » (2008, p.2). Nos souvenirs, les jours de la semaine, l'identification d'animaux ou rouler à bicyclette sont tous des exemples d'activités, de concepts ou de faits inscrits dans notre MLT. Comme la MDT, la MLT peut être divisée selon le type d'informations encodées, à savoir les connaissances explicites (déclaratives) et implicites (procédurales) (Tulving, 1985). Contrairement à la MDT, la MLT ne semble pas limitée en quantité d'informations pouvant être encodées dans le temps (Bear et al., 2005). La TCC s'intéresse à cette relation bidirectionnelle, particulièrement à l'impact fonctionnel en éducation des limites de la MDT.

2.2.2.2 Théorie de la charge cognitive

Les recherches en psychologie cognitive ont d'abord défini la charge cognitive comme étant « l'effort mental induit à la MDT par le nombre d'élaborations non automatiques nécessaires à la résolution d'un

problème » (Salomon, 1984, p. 648, notre traduction). Cette définition met de l'avant que la pratique permet de diminuer l'effort mental requis en automatisant les processus mentaux requis par la tâche (Feldon, 2007). La théorie de la charge cognitive (TCC) s'inscrit dans ce courant, Sweller (1988) stipulant que l'élaboration et l'intégration de schémas mentaux complexes permet de réduire le nombre d'éléments à traiter par la MDT, il consigne toutefois cette théorie dans un cadre éducatif : le design éducatif influence la charge cognitive de l'apprenant. C'est pourquoi Kalyuga affirme que la TCC est avant tout « une théorie sur l'apprentissage et l'enseignement décrivant les implications d'une activité pédagogique sur l'architecture cognitive [humaine] » (2011, p.1), architecture fondée sur la relation bidirectionnelle opérant entre la MDT et la MLT. Mais, parce que la mémoire de travail est limitée en nombre d'éléments pouvant être manipulés dans un temps restreint et que l'acquisition de schémas mentaux exige l'utilisation de cette ressource limitée (Sweller, 1988; Sweller et al., 1998), la TCC tente de lier l'apprentissage et l'utilisation de la MDT. Nous pouvons ainsi affirmer que « l'apprentissage est entravé lorsque la capacité de la mémoire de travail est dépassée lors d'une tâche d'apprentissage » (de Jong, 2010, p.106, notre traduction).

La TCC détermine trois catégories de CC (Sweller, 2005; Sweller et al., 2019), la charge extrinsèque (CE), la charge intrinsèque (CI) et la charge germane/essentielle (CG). La CE correspond à une utilisation inappropriée de la MDT, conséquence d'un design pédagogique indument complexe ou de particularités environnementales contrôlables ou non. La manière dont est présentée l'information peut occasionner une surcharge cognitive, par exemple, si des informations non pertinentes sont présentées, elles seront toutefois traitées par l'apprenant, cette situation impliquant une utilisation inutile de la MDT. L'environnement influence aussi la CE, les stimuli extérieurs pouvant être traités par la MDT (bruits, conversations, stimuli visuels), ou encore la façon dont l'information est présentée, une image et un texte explicatif étant trop éloigné l'un de l'autre, la MDT devra alors conserver l'information nécessaire à la compréhension de l'un ou de l'autre des éléments présentés et vice-versa.

La CI est la charge induite par la complexité de l'apprentissage et l'interactivité des éléments. D'après la TCC, des apprentissages requérant des schémas mentaux antérieurs non acquis entraveraient l'apprentissage, l'apprenant devant créer du sens à partir d'informations partielles, donc en manipulant une trop grande quantité d'éléments non agglomérés, augmentant ainsi la charge (Sweller et Chandler, 1994). L'interactivité réfère aux nombres d'éléments logiquement regroupés devant être traités simultanément en MDT par l'apprenant afin de produire un schéma complexe. Cela peut être confondu

avec la CE, mais dans le cas de la CE, c'est la façon dont l'information est présentée (conception pédagogique) ; pour la CI, l'interactivité entre les éléments est propre à chaque individu et découle de ses associations cognitives respectives, on ne peut donc pas abaisser cette charge sans simplifier l'information présentée.

La CG est apparue plus tard dans la TCC (Sweller et al., 1998), ce qui en fait une composante conceptuelle parfois critiquée (de Jong, 2010; Kalyuga, 2011). Cette charge essentielle est la charge induite par la création de schémas mentaux, c'est une charge découlant du processus d'acquisition et de récupération d'informations dans la MLT intégrant des schémas antérieurs non associés. Alors que la CE et la CI peuvent interférer avec l'apprentissage, la CG pourrait être conceptualisée comme la charge résiduelle utilisée pour apprendre. La figure 2.2 modélise l'additivité des composantes de la CC, l'enseignant souhaite donc décharger la MDT en contrôlant la CI et en diminuant la CE de l'apprenant afin que celui-ci utilise le bouclage acquisition/récupération pour opérer un changement dans sa MLT, définition cognitiviste d'un apprentissage (Kirshner, 2006).

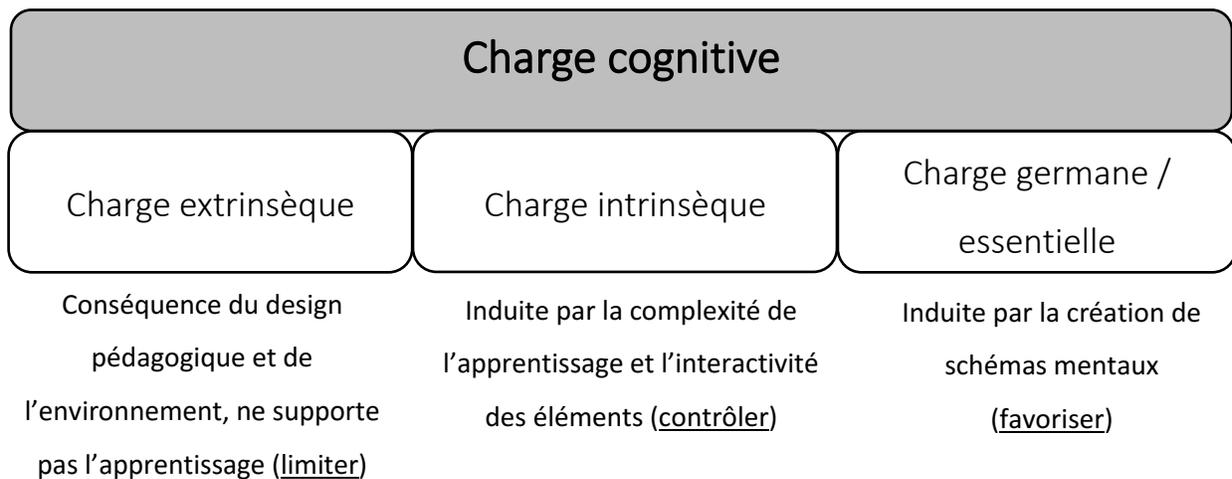


Figure 2.2 Additivité des composantes selon la théorie de la charge cognitive

2.2.3 Modèle de charge cognitive en éducation

Le concept de charge cognitive peut être utilisé dans différents contextes, la TCC est toutefois contextualisée en éducation, particulièrement dans la conception d'activités pédagogiques. À travers cette théorie, nous pouvons observer que la CC telle qu'expérimentée par l'apprenant est influencée par

plusieurs facteurs se déroulant simultanément lors d'une activité d'apprentissage, la CE, la CI et la CG permettant d'identifier des facteurs à contrôler lors de la planification d'une activité pédagogique. Chacune des charges est toutefois subdivisée en corrélats influençant la charge cognitive totale. La figure 2.3 identifie les différentes sous-composantes interagissant avec chacune des catégories précédemment citées et synthétise plus de 20 ans de recherches empiriques sur la TCC (Chen et al., 2017; Paas et Sweller, 2012; Sweller et al., 1998; Sweller, 2005; Sweller et al., 2019), nous définirons ensuite les différentes sous-composantes du modèle.

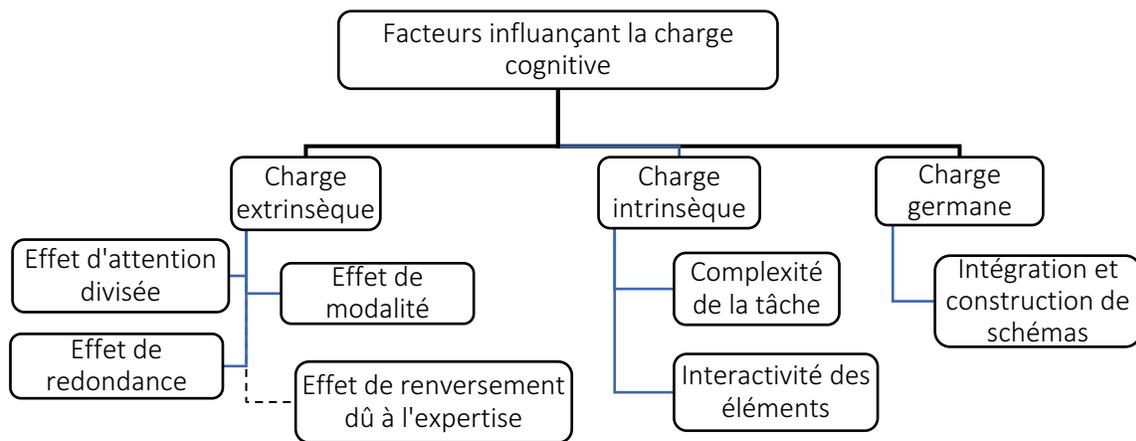


Figure 2.3 Le modèle de charge cognitive en éducation, adapté de Sweller (2005)

Nous avons abordé les facteurs influençant la CC précédemment. La CE doit être limitée, car elle ne supporte pas directement l'apprentissage, au contraire elle occasionne des manipulations inutiles à la MDT, entravant ainsi la construction de schémas mentaux. Différents effets influencent la CE et doivent être pris en compte pour limiter ce facteur externe. L'effet d'attention divisée survient lorsque l'étudiant divise son attention entre deux ou plusieurs informations visuelles mutuellement nécessaires pour comprendre l'ensemble de ce qui est présenté. (Sweller, 2005). Par exemple, en cuisine professionnelle, l'effet d'attention divisée peut être limité en faisant correspondre les ingrédients d'une recette avec la méthode (un ingrédient dans une colonne, la manipulation requise pour cet ingrédient dans une autre colonne, sur la même ligne) plutôt que d'inscrire tous les ingrédients et de faire suivre toute la méthode. L'effet d'attention divisée peut aussi se manifester lorsque l'étudiant divise son attention entre une information visuelle et auditive. Les deux modes doivent être coordonnées afin de limiter le maintien

inutile d'une information auditive expliquant le contenu visuel et vice-versa (Sweller, 2019). Cette différence modale peut toutefois être bénéfique, comme stipulé par l'effet de modalité. L'effet de modalité est basé sur la différenciation en MDT entre le traitement de l'information visuelle (calepin visuospatial) et auditive (boucle phonologique). La MDT se subdivise en sous-système partiellement indépendant (Baddeley, 2012; Baddeley et Hitch, 1974) et cette subdivision entre le traitement visuel et auditif permet de réduire la CE, comparativement à un traitement unimodal visuel ou auditif (Ginns, 2005). Pour que l'effet de modalité soit bénéfique pour l'étudiant, il importe que l'effet d'attention divisée soit pris en compte. À l'inverse de l'effet d'attention divisée qui met de l'avant la complémentarité des informations présentées, l'effet de redondance détermine que deux sources d'information présentant du contenu similaire, donc redondant, n'aident pas l'apprenant à mieux apprendre ce contenu (Sweller et Chandler, 1994), ce qui peut être contre-intuitif étant donné l'assomption que la présentation du contenu en double n'a pas d'effet négatif sur l'apprentissage (Sweller et al., 2019). Ce double traitement cognitif, donc le maintien de deux éléments redondants en MDT, engorge inutilement celle-ci tout en augmentant l'interactivité des éléments présentés (sous-composantes de la CI).

Si la CE doit être limitée, la CI peut être contrôlée en présentant du contenu pédagogique correspondant à ce que l'apprenant est en mesure d'apprendre. Cette affirmation peut sembler évidente, pourtant, l'équilibre entre un contenu accessible pour l'étudiant, mais présentant un défi pour celui-ci, est au cœur du processus d'apprentissage (Hattie et Clarke, 2019; Schnotz et Kürschner, 2007; Vygotski et al., 2015), la TCC délimite cet espace par l'interactivité des éléments présentés en MDT comme balise (Chen et al., 2018; Sweller, 2019). L'interactivité des éléments est un concept de base de la TCC et se définit par le nombre d'éléments devant être traités simultanément en MDT, car logiquement regroupés, lors d'un apprentissage (Chen et al., 2018). Par exemple, nous pourrions distinguer lors de l'apprentissage d'une langue, l'apprentissage de mots de vocabulaire hors contexte (faible interactivité) de la compréhension d'une phrase les regroupant, où nous devrions traiter l'ordre, la syntaxe et le sens de la phrase (forte interactivité). Un constat s'impose toutefois, il est empiriquement impossible de quantifier avec précision l'interactivité des éléments puisque les inférences requises et les inhibitions en résultant, les représentations mentales, les connaissances antérieures implicites à la compréhension du matériel présenté résultent de l'expérience de chacun et imposent vraisemblablement une certaine charge à la MDT qui diffère selon les individus (Chen et al., 2018; Kalyuga, 2015). Néanmoins, les études démontrent que la CI varie selon le matériel pédagogique présenté (Chen et al., 2018; Kalyuga, 2007; Sweller, 2005; Sweller et al., 2019) et varie en fonction du niveau d'expertise de l'apprenant : pour l'apprentissage et

l'utilisation des termes reliés à un métier par exemple, un étudiant avancé dans un curriculum percevra l'effet d'interactivité différemment (CI basse) de quelqu'un débutant un programme (CI haute). Dans le contexte pratique de cette recherche, l'interactivité se rapporte au niveau de rétroaction utilisé par l'enseignant en fonction des apprentissages préalables de l'apprenant, la nature de la rétroaction induisant des manipulations mentales respectant les limites de sa MDT (CI basse) ou hors de sa portée actuelle (informations non agglomérées, CI haute). Cette différence perceptuelle d'interactivité réfère à un concept précédemment cité, l'effet de renversement dû à l'expertise. Cet effet énonce qu'une conception pédagogique permettant d'obtenir de meilleurs résultats chez des novices qu'une autre conception s'atténue avec le développement de l'expertise de l'apprenant, jusqu'à donner un effet nul et même inverse (Kalyuga, 2007; Sweller, 2019). Il existe un effet d'interaction statistique entre le niveau d'expertise et la CI découlant de l'interactivité des éléments à apprendre (Chen et al., 2018), cet aspect implique d'ailleurs un changement dans la TCC actuelle, l'effet de renversement dû à l'expertise est dorénavant considéré comme une variante du principe d'interactivité (Sweller, 2019). L'effet de renversement dû à l'expertise était auparavant présenté comme une composante de la CE (Kalyuga, 2007; Sweller, 2005) ; ne participant pas directement à l'apprentissage, cet effet devait être limité. Il apparaît pourtant que cette composante interagit avec la façon dont l'information est présentée (CE) et l'interactivité des éléments (CI). Nous avons supposé dans la section de ce chapitre traitant des effets des rétroactions sur la performance (Tableau 2.2, p.24), que c'est cet effet de renversement qui pourrait être corrélé aux résultats contradictoires concernant la rétroaction sur la tâche : l'enseignement d'une stratégie de résolution de problème renversant l'effet (de positif à négatif) de la rétroaction sur la tâche chez des apprenants novices.

La CG apparaît subséquemment dans la TCC (Sweller et al., 1998), elle est déterminée comme étant la charge induite par la construction de schémas mentaux et l'automatisation de processus cognitifs (De Jong, 2010, Sweller, 2005). Cette charge a été introduite afin d'expliquer des données empiriques contradictoires où lors de gain de performance par les apprenants, la CC totale était perçue comme étant élevée, mais où la CE et la CI étaient contrôlées. Sweller et collègues (1998) ont donc supposé qu'une charge additionnelle contribuait à la CC totale en prenant la place résiduelle en MDT, la CG : par exemple, si la CE est basse, la CG substitue cette charge et l'attribue au développement de schémas mentaux. C'est l'objectif à la base de la TCC, l'apprentissage est accru lorsque la CE est limitée et que la CI est contrôlée, car la CG a davantage de ressources en MDT pour participer à l'apprentissage. Toutefois, plusieurs études empiriques indiquent qu'une baisse de CE est associée à une baisse de la CC perçue, donc que la

substitution de la CE par la CG n'est pas automatique ou délibérée (Sweller, 2019). C'est pourquoi la TCC actuelle (2019) détermine un rôle d'allocation de ressources cognitives à la CG : plutôt que de contribuer à la charge totale, la CG restitue les ressources en MDT provenant d'une activité cognitive externe à la tâche en les allouant au traitement de l'information requise pour la tâche d'apprentissage. Cependant, l'absence d'études empiriques utilisant ce modèle nous oriente vers un modèle mixte (Figure 2.3) découlant des études ayant conceptualisé la CG comme la charge impliquée dans l'intégration des apprentissages, la création de schémas résultant du processus d'acquisition, de récupération et de transformation de l'information en MLT.

Le modèle de CC à trois composantes doit être abordé de façon dynamique. La CE, la CI et la CG sont interreliées, elles peuvent difficilement être isolées, car les sous-composantes interagissent entre elles. La CE peut expérimentalement être contrôlée, car les effets d'attention divisée, de modalité et de redondance peuvent être manipulés; en revanche l'effet de renversement dû à l'expertise l'effet modère cette charge (Chen et al., 2018; Kalyuga, 2015) et est une variante de l'effet d'interactivité (Chen et al., 2018; Sweller, 2019). La CG alloue les ressources cognitives nécessaires à la compréhension de la tâche, à la sélection d'informations pertinentes, à l'activation de connaissances et à la création de schémas en MLT, mais il est difficile de lui octroyer un traitement, sous forme de charge, en MDT. C'est pourquoi nous croyons que la TCC doit être abordée dans son ensemble et que les mesures utilisées doivent le permettre.

2.2.4 Mesures de la charge cognitive

Nous avons vu que la CC est influencée tant par la conception de l'activité d'apprentissage que par les caractéristiques individuelles de l'apprenant. Si une certaine charge peut être ressentie par celui qui exécute une tâche, un des principaux enjeux avec la TCC vient de la difficulté à mesurer cette charge, du fait qu'elle varie au cours de la tâche (de Jong, 2010), possiblement à chaque instant (Mercier et Bédard, 2016). Les différents types de mesure devraient permettre d'évaluer la CC sous différentes formes temporelles, comme la charge instantanée (moment spécifique) et le pic de charge (charge instantanée maximale), la charge moyenne (CC moyenne pour une partie précise de la tâche) et la charge globale (charge cumulative durant une partie précise de la tâche d'apprentissage), et la charge accumulée (charge totale ressentie au cours de la tâche) (de Jong, 2010; Paas et al., 2003).

Nous pouvons distinguer quatre approches pour mesurer la CC, deux relèvent de mesures subjectives et deux de mesures qualifiées d'objectives. La première mesure subjective est un questionnaire autorapporté

mesurant l' « effort mental » perçu (Paas et Van Merriënboer, 1994). Bien que permettant d'obtenir une mesure de charge telle que vécue par le sujet, les échelles diffèrent d'une étude à l'autre et les charges perçues perdent de la fiabilité dépendamment du moment où le questionnaire est rempli (de Jong, 2010). Finalement, ce type de questionnaire permet de se renseigner sur la CC moyenne, globale et accumulée de la tâche, mais non sur un moment précis, tel que contextualisé par cette recherche.

La deuxième mesure subjective réfère aussi à un questionnaire autorapporté, mais plutôt que de mesurer l'effort mental global, les mesures renvoient aux différentes catégories (CE, CI et CG) de CC (Leppink et al., 2013). Ce type de questionnaire sépare l'effort mental, les distracteurs et la fatigue cognitive de l'apprenant, en fonction de ses résultats. Bien que prometteur, obtenir des mesures distinctes des différentes charges perçues ne pas d'attester d'un type de charge à un moment précis et des données empiriques supplémentaires devront être recueillies pour valider cet outil de collecte (Sweller et al., 2019).

La troisième approche de mesure se veut objective et utilise une tâche secondaire pour estimer la CC. Cette approche empruntée de recherches en psychologie consiste à introduire une tâche secondaire en parallèle de la tâche d'apprentissage principale (de Jong, 2010). Au cours d'une tâche, l'apprenant peut être amené à identifier un stimulus visuel ou auditif qui n'est pas associé à la tâche d'apprentissage comme tel, ou encore mémoriser des lettres sans lien avec l'objectif d'apprentissage. Les résultats à la tâche secondaire deviennent les indicateurs de la charge cognitive expérimentée pendant la tâche principale : une performance basse à la tâche secondaire indiquerait une charge cognitive haute pendant la tâche principale et vice-versa (Sweller et al., 2019). Il est à noter qu'en éducation, l'utilisation de tâches secondaires demeure rare et que la mesure de la CC à un moment précis reste, dans une moindre mesure, un problème. De plus, la tâche secondaire peut interférer avec la tâche principale, induisant ainsi une charge supplémentaire à la MDT, de même qu'une certaine fatigue cognitive (Chen et al., 2018).

La quatrième approche, objective, provient d'indicateurs psychophysiologiques et peut estomper certains enjeux conceptuels (subjectivité des mesures et variabilité des outils de collecte) et opérationnels (mesures en temps réel, absence de tâche secondaire). Les recherches en neuroscience supposent que les fonctions cognitives associées à une activité peuvent parfois être observables à partir de variations psychophysiologiques (Antonenko et al., 2014; de Jong, 2010; Sweller et al., 2019). Les réponses physiologiques induites par le traitement de l'information et manifestées ou non par des comportements peuvent indiquer certaines fonctions cognitives (Andreassi, 2007), comme la charge induite à la MDT

(Gevins et Smith, 2003). Il devient donc possible de mesurer la CC à partir de changements se produisant dans différents systèmes (sanguin, endocrinien, nerveux, respiratoire entre autres), l'objet de la recherche spécifiant la pertinence d'utiliser un protocole neuroscientifique en tant que complément des mesures comportementales (De Smedt, 2014). Les instruments de mesure utilisés peuvent toutefois être encombrants, ce qui est d'ailleurs critiqué (de Jong, 2010), mais des développements technologiques ont permis d'augmenter la mobilité de certains dispositifs de collecte, permettant ainsi une validité écologique accrue. Parmi les outils de mesure provenant des neurosciences et utilisés en science de l'éducation pour mesurer la CC, le suivi-oculaire (Lai et al., 2013), l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) (Whelan, 2007) et l'EEG (Antonenko et al., 2014) sont fréquemment utilisés.

Sans distinguer les catégories (CE, CI, CG), certaines mesures physiologiques comme l'EEG permettent de mesurer finement la CC instantanée, sur laquelle se base les autres types de CC (moyenne, pic, globale et accumulée) à partir de données normalisées. Le contexte de la présente étude nous oriente donc vers ce type de mesure.

2.2.5 Critiques conceptuelles et limites empiriques

La TCC a mis en lumière différentes variables expliquant l'impact qu'à la conception d'activités pédagogiques sur l'apprentissage. Certaines critiques conceptuelles et méthodologiques doivent toutefois être prises en compte. Les enjeux conceptuels sont principalement regroupés autour des types de charges, leurs interactions et leur additivité. Comme le mentionne De Jong (2010), la manière dont l'information est présentée (CE) peut avoir un impact sur la difficulté réelle de la tâche (CI), alors que le modèle de Sweller (1998, 2005) ne suppose pas cette relation, la CE ne supportant pas l'apprentissage. L'effet de renversement dû à l'expertise permet néanmoins de répondre partiellement à cet enjeu (Chen et al., 2018). N'apparaissant pas dans le premier modèle de Sweller (1988), la CG est parfois considérée comme conceptuellement floue : d'une part parce que ce concept succédant à la CI et la CE vise à expliquer des données empiriques ne pouvant être élucidées par les deux charges (de Jong, 2010), de l'autre, mis à part une différence ontologique, la CI référant à l'objet (matériel pédagogique) et la CG au processus (ce qui arrive durant l'apprentissage), il est difficile de séparer empiriquement ces deux concepts (Kalyuga, 2011). Cette difficulté à catégoriser les charges est aussi soulevée par Gerjets et collègues (2009) qui relèvent l'impossibilité de falsifier certaines composantes de la charge cognitive, car il paraît impossible de mesurer adéquatement ou précisément les différentes charges. Pour ces auteurs ce n'est pas tant le concept de charge cognitive qui pose un problème, mais plutôt ses sous-composantes conceptuelles. La CC est ainsi

admise comme charge totale induite à la MDT par un processus cognitif, mais la part respective des sous-composantes ne peut être déterminée de façon précise. Le contexte de la présente étude nous renvoie à des mesures de CC instantanée, donc la charge cognitive totale (CE+CI+CG) à un moment précis associée à un niveau de rétroaction. Les limites conceptuelles précédemment soulevées visent la distinction des charges entre elles et leur part respective dans l'additivité de la CC totale et non la CC comme somme de ses sous-composantes.

Les méthodologies utilisées pour relier la TCC à l'apprentissage peuvent parfois être critiquées. Les échantillons sont souvent composés d'étudiants ayant à apprendre du contenu sans pertinence pour leur champ d'études (de Jong, 2010) : si ce design permet un certain contrôle expérimental sur les connaissances préalables des étudiants, cela soulève l'enjeu de l'investissement réel de ceux-ci dans la tâche d'apprentissage et l'homogénéité du groupe peut miner la validité externe des résultats. Le temps réservé à l'apprentissage est habituellement court (moins de 20 minutes), ce qui ne permet pas d'apprentissages complexes et les étudiants n'ont pas la possibilité de prendre en note les informations présentées, donc de décharger leur MDT sous forme d'artefacts cognitifs tangibles (Clark, 2010), diminuant ainsi la validité écologique des études. Ce compromis entre la faisabilité d'un protocole et les objectifs visés par la recherche ne permet pas toujours de distinguer la réussite de la tâche, donc l'apprentissage de contenu, de la compréhension du contenu présenté, dans une tâche décontextualisée par exemple (Schnotz et Kürschner, 2007). Les outils utilisés pour mesurer la CC peuvent modérer l'interprétation pouvant être faite des résultats de recherche. Les données issues des questionnaires auto-rapportés, donc en fonction de l'effort mental perçu par le sujet, posent des enjeux de validité interne. Les résultats obtenus à l'aide des outils de collectes subjectifs ont des propriétés psychométriques bien documentées (Paas et al., 2003; Sweller et al., 2019), pourtant, plusieurs études n'ont pu distinguer des différences de CC perçue dans leurs échantillons, alors que les performances des participants se différencient (De Jong, 2010). Les différences individuelles sont aussi à prendre en compte, la réussite ou non de la tâche ne peut être qu'attribuable à la TCC : les habiletés cognitives et spatiales, le degré d'expertise, la motivation et les intérêts pouvant influencer les résultats (De Jong 2010, Fyfe, 2015). Bien que moins usuels dans les recherches sur la charge cognitive (Sweller, 2019), principalement à cause de la difficulté à les implanter dans des contextes scolaires, les outils de mesures physiologiques ont été retenus pour cette étude. Ils permettent de mesurer la charge cognitive instantanée, atténuant ainsi certains enjeux méthodologiques liés aux mesures subjectives qui ne peuvent mesurer la CC qu'après la tâche (De Jong, 2010).

2.3 Objectifs de cette recherche

Cette recherche s'articule sur la superposition du modèle de rétroaction efficace de Hattie et Timperley (2007) et de la TCC (Sweller, 1988, 2019). Nous avons pu constater que les rétroactions ont des impacts différents selon leur niveau, le niveau d'expertise de celui qui la reçoit, la complexité de l'apprentissage en cours et le moment où la rétroaction est donnée (Fyfe et Rittle-Johnson, 2016; Hatala et al., 2014; Hattie et Timperley, 2007; Moreno, 2004; Van der Kleij et al., 2015). En documentant l'effet sur la CC des quatre niveaux de rétroaction de Hattie et Timperley (2007), il sera possible, pour notre échantillon d'apprenants, de vérifier si les rétroactions ont des impacts cognitifs différents selon leur nature, permettant ainsi la production de données empiriques précises présentement absentes dans la littérature. Nous avons aussi relevé que les études s'étant penchées sur cette relation ont mesuré la CC à partir de questionnaires autorapportés (Fyfe et Rittle-Johnson, 2016; Moreno, 2004), ce qui ne permet pas de mesurer la CC instantanée et limite l'analyse pouvant être faite des résultats préalablement obtenus (de Jong, 2010).

Le niveau de rétroaction et le niveau d'expertise de l'apprenant entretiennent une relation empiriquement et théoriquement équivoque et la TCC pourrait nous aider à décrire l'impact mitigé des rétroactions sur les apprentissages se déroulant en atelier (Fyfe et Rittle-Johnson, 2016; Moreno, 2004). Un étudiant qui progresse dans un curriculum n'obtiendrait pas les mêmes performances en fonction du niveau visé par la rétroaction qui lui est offerte ou qu'il sollicite (Van der Kleij et al., 2015; Wisniewski et al., 2020) et de sa maîtrise de l'objet d'apprentissage (Chen et al., 2017; Kalyuga, 2015; Schnotz et Kürschner, 2007). Chez le novice, la rétroaction atteint-elle son but qui est de diminuer l'écart entre ce que l'apprenant produit/comprend et ce qui est souhaité par l'enseignant ou le niveau de rétroaction entrave-t-il le processus d'acquisition/récupération en MLT en surchargeant la MDT de l'apprenant (Fyfe et Rittle-Johnson, 2016; Moreno, 2004) ? Cette hypothèse théorique est déductive de la TCC et n'a pas été testée empiriquement à partir de lectures psychophysiologiques. Cette absence renforce la pertinence de documenter l'effet du niveau de rétroaction sur la CC de l'apprenant.

Il apparaît que pour l'apprenant davantage avancé dans un programme d'études, donc qui utilise certaines compétences développées antérieurement sur une base quotidienne, le niveau de rétroaction influence différemment la CC, la TCC supposant un changement au niveau de l'interactivité (CI) des éléments traités en MDT et une automatisation de sous-processus cognitifs (CG) par rapport au novice débutant un programme (Chen et al., 2017; Kalyuga, 2015; Sweller et al., 2019). Ainsi, afin de comprendre davantage la relation entre les niveaux de rétroaction et la charge cognitive d'apprenants en situation pratique et la

variabilité des niveaux de rétroaction en lien avec le développement de l'expertise de l'apprenant, cette recherche a pour objectifs les suivants :

- Décrire et expliquer, à partir de lectures psychophysiologiques, la relation entre le niveau de rétroaction verbale utilisé par l'enseignant en atelier pratique et la charge cognitive associée au traitement de cette rétroaction par l'étudiant ;
- Comparer les mesures de charge cognitive associées au traitement des niveaux de rétroaction des apprenants à différents moments de l'acquisition d'une compétence.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Cette recherche quantitative a pour objectif de décrire et expliquer la relation entre le niveau de rétroaction verbale utilisé par l'enseignant en atelier pratique et la charge cognitive associée au traitement de cette rétroaction par l'étudiant. Cette recherche corrélacionnelle vise ainsi la production de données empiriques permettant de comprendre davantage cette relation. Nous aborderons dans ce chapitre la composition de l'échantillon, les mesures utilisées, le devis et le choix de la tâche d'apprentissage, puis nous concluons avec un plan d'analyse des données.

3.1 Échantillon

La présente recherche a eu lieu en formation professionnelle (FP) dans le secteur de l'alimentation et du tourisme, en *Cuisine 5311*. Les étudiants ont été recrutés sur une base volontaire en janvier 2022. Un échantillon de convenance de 33 participants (sept femmes) de 18 à 33 ans ($M = 23$, écart-type = 4) provenant de la FP a été composé, excluant ainsi les étudiants de la FT qui pouvaient aussi faire partie de l'échantillon (Fortin et Gagnon, 2016). Les objectifs de cette recherche visent à décrire et expliquer l'effet de différents niveaux de rétroaction sur la charge cognitive d'apprenants et à comparer ces mesures en fonction du degré d'expertise des apprenants. Ainsi, 17 étudiants débutaient le programme (première session) et 16 étudiants étaient en voie de le terminer (troisième session), et ce, peu importe s'ils étaient employés dans le domaine de la restauration ou non. Leur expérience professionnelle a été documentée afin de vérifier si cette variable externe influence les résultats des deux sous-groupes en fonction de leur position respective dans le cursus scolaire ($M = 2,21$ années d'expérience, écart-type = 2,11). À la suite de l'approbation déontologique (APPENDICE A) des comités d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et de l'Institut de tourisme et d'hôtellerie du Québec (ITHQ), le recrutement a été fait en janvier 2022 à l'ITHQ, lors d'une journée d'accueil pour les nouveaux étudiants et directement en classe pour les étudiants de troisième session. Le formulaire de consentement (APPENDICE B) leur a été présenté lors de ces rencontres.

L'ITHQ est un institut provincial situé à Montréal spécialisé en tourisme, hôtellerie et restauration, offrant des formations créditées en formation professionnelle, collégiale et universitaire. L'ITHQ comptait pour l'année scolaire 2021-2022 près de 1180 étudiants répartis dans les trois ordres d'enseignement, dont 199

en cuisine professionnelle et 157 en gestion d'un établissement de restauration². Les participants ont reçu pour leur participation à cette recherche une compensation d'un montant forfaitaire de 30 \$.

3.2 Mesures

Dans le chapitre II, nous avons établi en quoi le modèle de Hattie et Timperley (2007) permet de catégoriser le niveau de rétroaction (Tâche, Processus, Autorégulation et Soi) pouvant être donné en atelier tout en respectant les exigences et contraintes de ce contexte. Afin d'observer la relation entre le niveau de rétroaction, la variable indépendante, et la charge cognitive associée, la variable dépendante, nous avons mesuré la charge cognitive instantanée induite par ce traitement cognitif. Cette section présente le choix de l'outil de mesure et l'index permettant de mesurer la charge cognitive (CC).

3.2.1 L'électroencéphalogramme

L'EEG, du fait de sa résolution temporelle la plus élevée, est tout indiqué pour mesurer la CC instantanée, donc résultante d'une rétroaction donnée en atelier de cuisine, mais un système haute densité (en termes de quantité d'électrodes) serait difficilement utilisable en atelier, en premier lieu pour des raisons de mobilité. L'EEG moins haut de gamme permet d'être aménagé en système portatif et permet d'obtenir des lectures scientifiquement admises (Lin et al., 2008), tout en procédant à une collecte de données à l'intérieur d'un environnement écologiquement valide, permettant ainsi de répondre aux critiques souvent associées aux recherches en neurosciences (Ansari et al., 2012; Chang et al., 2022). Örün et Akbulut (2019) ont démontré, à partir de mesures subjectives toutefois, que le port de l'EEG ne semble pas induire davantage de manipulations en MDT à celui qui le porte, donc que son utilisation ne devrait pas biaiser la mesure de CC de l'apprenant monitoré avec un EEG.

3.2.2 La désynchronisation frontale et pariétale comme mesure de la charge cognitive

Le pourcentage de désynchronisation reliée à un événement (%DRE) entre le lobe frontal (F), fréquence thêta, et le lobe pariétal (P), fréquence alpha, sur la ligne médiane (z) de l'EEG, est sensible au nombre d'éléments maintenus dans la MDT et contribue à déduire une charge cognitive haute d'une charge basse (Antonenko et al., 2014; Friedman et al., 2019; Gevins et Smith, 2003; Grimes et al., 2008; Holm et al., 2009a; Örün et Akbulut, 2019). Nous avons brièvement abordé dans le chapitre I traitant de la problématique l'électroencéphalogramme : celui-ci capte la fréquence de dépolarisation synchronisée des

² https://www.ithq.qc.ca/wp-content/uploads/2023/05/ITHQ_rapport-annuel-gestion_2021-2022.pdf

neurones pyramidaux (Demanuele et al., 2013; Heisz et McIntosh, 2013). Les électrodes de l'EEG sont sensibles au voltage produit par cette dépolarisation, induite en réaction à un stimulus ou à l'état de repos (*resting-state EEG*). La fréquence de cette dépolarisation est associée à différents états cognitifs, la correspondance admise entre le signal électrique et une fréquence donnée permet de catégoriser les fréquences en cinq bandes (Heisz et McIntosh, 2013) : delta <4Hz (sommeil profond, coma), thêta 4-8Hz (activité limbique: mémoire et émotions), alpha 8-12Hz (sujet alerte, sans toutefois un traitement actif de l'information), bêta 13-30Hz (sujet alerte et traitant activement de l'information) et gamma >30-35Hz (pourrait être relié à la conscience, liens entre différentes régions cérébrales pour former un concept cohérent). D'après l'hypothèse de communication par cohérence fréquentielle, les lobes du cerveau interagissent en synchronisant ou en désynchronisant leurs fréquences électriques, la cohérence oscillatoire reflétant un couplage fonctionnel (Varela et al., 2001). Les très basses fréquences (<0,5 Hz) pourraient être associées à des mécanismes de maintenance ou d'activités cérébrales internes sans stimulus externe (Demanuele et al., 2013), les plus hautes fréquences (delta à gamma) étant associées à des états mentaux (Nurislamova et al., 2019).

Sous forme d'index, la désynchronisation Fz thêta/Pz alpha permet de suivre en continu la charge associée à un stimulus externe, l'index étant aussi sensible aux facteurs internes de l'apprenant, comme le manque de sommeil, le stress ou les différences cognitives interindividus (Holm et al., 2009). La figure 3.1 décrit le positionnement des électrodes sur le crâne représenté de manière sphérique et identifie les électrodes d'intérêt.

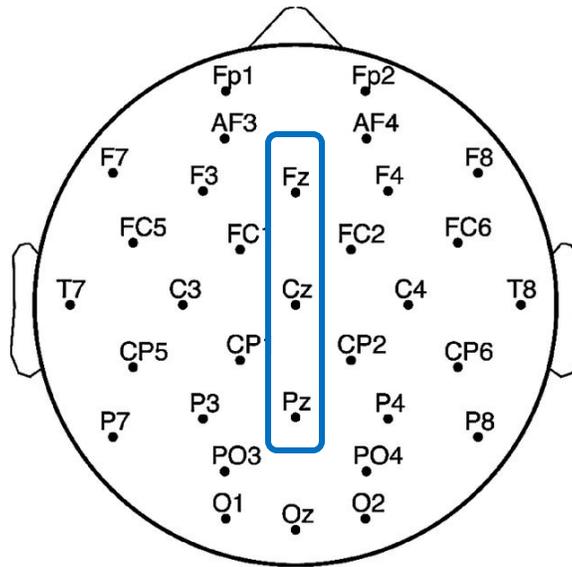


Figure 3.1 Positionnement des électrodes Fz/Pz adapté de Yazdani et collègues (2012)

L'index Fz thêta/Pz alpha résultant du pourcentage de désynchronisation relié à un évènement (%DRE) est unique à chaque individu, cette mesure compare l'activité cérébrale d'un apprenant au repos et lorsqu'il est engagé dans une tâche d'apprentissage (Antonenko et al., 2014). Cette mesure continue varie dans le temps et est un indice fiable attestant du nombre d'items maintenu dans la MDT (Holm et al., 2009). Nous pouvons ainsi transposer, à la lumière de la TCC, l'index Fz thêta/Pz alpha comme un indicateur de la CC nous permettant de distinguer une CC élevée, laissant peu de place à la création de schémas mentaux, d'une CC basse où la charge extrinsèque est contrôlée et la charge intrinsèque et la charge germane participent, avec moins de contraintes de stockage temporel dans la mémoire de travail, au processus d'acquisition et de récupération dans la mémoire à long terme. Cependant, les scores doivent être normalisés en score Z afin de pouvoir comparer les apprenants entre eux puisqu'ils n'ont pas tous la même mesure de CC au repos et qu'ils n'expérimentent pas tous la même charge en réaction à un stimulus, la surcharge variant d'un individu à l'autre en fonction des ressources disponibles en MDT. Le score normalisé, à savoir la charge cognitive associée à chaque niveau de rétroaction par rapport à la charge cognitive moyenne, devient alors le référent permettant de positionner les niveaux de rétroaction entre les apprenants.

3.3 Devis

Le devis utilisé pour cette recherche est corrélationnel, il vise à vérifier la relation entre deux variables exprimées de manière quantitative (Gaudreau, 2011) : la charge cognitive (variable dépendante ou plus précisément critère, continue) et le niveau de rétroaction (variable indépendante ou plus précisément prédictive, catégorielle à 4 niveaux) et ce, en considérant l'expertise échantillonnée de manière transversale (étudiants débutant et finissant le programme d'études). Ainsi, dans un atelier pratique, donc en cuisine, les participants préalablement assignés ont effectué individuellement une activité d'apprentissage d'une vingtaine de minutes reliée à leur programme d'études. Les 33 apprenants ont été monitorés une fois chacun, leur degré d'avancement dans le programme déterminant leur sous-groupe. Trois sessions sont nécessaires à l'ITHQ pour obtenir le diplôme d'études professionnelles (DEP) en cuisine, 17 étudiants provenaient de la première session et 16 de la troisième. Les participants ont été exposés à différents niveaux de rétroaction, la CC a été mesurée à l'aide de l'EEG et ensuite associée aux différents niveaux de rétroaction tel que déterminé par le modèle de Hattie et Timperley (2007).

3.3.1 Planification et choix de la tâche d'apprentissage comme contexte d'expérimentation

La compétence *Fruits et légumes 404594* (MELS et al., 2008, p.37) est tout indiquée pour la collecte de données. Elle est enseignée sur plusieurs jours dès le début de la première session et elle est réinvestie tout au long du programme, les étudiants de troisième session la mobilisant lors des apprentissages subséquents (MELS et al., 2008, p.12). Nous avons ciblé les taillages de base pour évaluer les étudiants, il s'agit un élément de compétence qui est reproduit durant tout le cursus de l'apprenant. Cette tâche est relativement simple, même pour un étudiant de première session sans expérience professionnelle, car elle ne requiert pas de planifier de cuisson ou de service. Elle permet de contrôler la complexité de l'objet d'apprentissage, ce qui n'est pas sans conséquence sur l'efficacité de la rétroaction (Hatala et al., 2014; Hattie & Timperley, 2007). Chaque étudiant devait donc effectuer différentes coupes (brunoise, macédoine et légume tourné lorsque le temps le permettait) avec les mêmes légumes (carotte, céleri et pomme de terre). Les étudiants de première session avaient tous préalablement vu et pratiqué les taillages auprès de leur enseignant titulaire, les étudiants de troisième session avaient obligatoirement réussi cette compétence puisque c'est une compétence préalable dans leur cheminement. Les étudiants ont donc été évalués et monitorés lors d'une activité d'apprentissage ciblant un élément de compétence précis plutôt qu'une tâche planifiée par le chercheur. Cette approche ne permet pas de contrôler la variable indépendante, les rétroactions de l'enseignant-chercheur découlent de l'analyse qu'il fait de la situation pédagogique, ou d'isoler des facteurs pouvant influencer la variable dépendante, la CC. Toutefois, les

étudiants ont exécuté les mêmes tâches, ce qui permet un certain contrôle de la validité interne de l'étude. Notre approche comporte aussi un avantage non négligeable nous dirigeant vers ce compromis méthodologique. Elle permet de résoudre deux enjeux méthodologiques soulevés précédemment dans le cadre théorique : d'une part, le dispositif permet d'appréhender la charge cognitive dans un contexte authentique où l'objet d'apprentissage est issu du curriculum, répondant ainsi à De Jong (2010) sur l'investissement réel des participants dans la tâche, de l'autre, le contexte de production des données recueillies par l'EEG est sensiblement le même que le contexte d'utilisation souhaité des résultats obtenus, permettant ainsi de contrôler en partie la validité écologique du dispositif, limite soulevée de façon récurrente lorsque nous souhaitons aborder un objet éducatif à partir de méthodologies issues des neurosciences (Ansari et al., 2012; Antonenko et al., 2014).

3.3.2 Déroutement

Nous avons procédé à la collecte de données de février à avril 2022 à partir d'un calendrier de collecte flexible pour les étudiants. Lors des journées de collecte, dans le local de cuisine de l'étudiant, mais hors des heures de cours, nous avons monitoré chaque étudiant avec un EEG actiCHamp de 32 électrodes et nous avons filmé la séquence avec la caméra d'un téléphone cellulaire (Samsung A20, résolution de 30 images par seconde). Un gel électrolytique à base d'eau a été appliqué sous chaque électrode afin de favoriser la conductance électrique, l'impédance visée était de moins de 10k Ω pour chaque électrode et moins de 5k Ω pour les électrodes d'intérêts (électrode de mise à terre, Fz, Cz et Pz). Le signal de l'EEG a été enregistré avec le programme Brain Vision Recorder™.

Avant de débiter l'activité d'apprentissage, nous avons administré à chaque participant une tâche mnésique importante (tâche *n-back*, voir Scharinger, 2017) afin d'obtenir un ratio permettant, sur une base individuelle, de mesurer une utilisation élevée de la MDT par rapport à une utilisation passive. Nous avons ensuite prévu une période de 25 secondes où l'apprenant n'était engagé dans aucune tâche cognitive particulière. Cette période qui correspond au montage du poste de travail par l'étudiant a servi à établir une référence de base (RéfB), donc une activité cognitive passive, mais où l'apprenant se meut naturellement dans son environnement. À son poste, le participant a ensuite exécuté les manœuvres requises par l'enseignant-chercheur, qui lui a fait des rétroactions en fonction de ce qu'il observe et des questions de l'apprenant. Durant l'activité d'apprentissage, l'enseignant-chercheur s'est efforcé d'utiliser différents niveaux de rétroaction afin de documenter la charge cognitive associée à tous les niveaux de rétroaction du modèle de Hattie et Timperley (2007), car comme nous l'avons mentionné dans le chapitre

II, 90% des rétroactions verbales visent la tâche (Hattie et Timperley, 2007), ce qui réduit considérablement les lectures de CC pouvant être associées aux autres niveaux de rétroaction (RT, RA et RS). Une attention particulière a été portée afin de ne pas intégrer de RS avec un autre niveau de rétroaction, ce qui aurait occasionné des difficultés de codage et aurait rendu difficile l'analyse de la CC pour ces niveaux combinés. Le tableau 3.1 rapporte des exemples de niveaux de rétroaction donnés aux apprenants durant la collecte de données.

Tableau 3.1 Niveaux de rétroaction fournis à l'apprenant pendant le taillage de la macédoine

Niveaux			
Rétroaction sur la tâche	Rétroaction sur le processus	Rétroaction sur l'autorégulation	Rétroaction sur le soi/affect
La taille n'est pas régulière.	N'appuie pas ton doigt sur la lame du couteau, ce n'est pas stable.	Si tu remarques que ta première tranche est trop épaisse, pourquoi est-ce que tu l'utilises ?	Ton prof m'a dit que tu étais le meilleur, mais bon...

3.4 Préparation des données et plan d'analyse

3.4.1 Codage des niveaux de rétroaction

Les 33 vidéos ont été exportées sur Observer XT™ afin de synchroniser les bandes vidéos/audios aux mesures de CC. Ce logiciel permet de coder des observations selon différents critères, d'intégrer et de superposer des lectures physiologiques et psychophysiologiques sur celles-ci. Les visionnements ont permis d'identifier les niveaux de rétroaction donnés à l'apprenant à des moments précis à partir du modèle de rétroaction efficace de Hattie et Timperley (2007). Ce modèle permet d'identifier avec succès les niveaux de rétroactions opérant naturellement en classe, autant celles venant de l'enseignant que d'autres étudiants (Brown et al., 2012; Gan, 2011; Harris et al., 2015). Lors d'observations ambiguës (particulièrement la distinction entre des niveaux Processus et Autorégulation), le codage a été supporté à l'aide de la matrice élaborée par Gan (2011, Annexe A) et découlant du modèle de Hattie et Timperley (2007). Un codage double en aveugle de 10% du corpus a été effectué avec la collaboration d'une assistante de recherche afin de s'assurer que les niveaux de rétroactions sont bien identifiés (Blais et Martineau, 2006). En concordance avec les études ayant utilisées ce modèle, nous avons obtenu un accord

interévaluateurs substantiel, $K = ,82$, ce qui laisse supposer une très bonne identification des niveaux de rétroaction (McHugh, 2012). Les mesures de CC ont ensuite été appariées à chaque rétroaction, en divisant les périodes d'intérêt en segment d'une seconde.

3.4.2 Préparation du signal EEG et calcul de la métrique de charge cognitive

Le signal brut capté par l'EEG ne peut être utilisé directement pour mesurer la CC, un prétraitement est nécessaire afin de filtrer le signal capté par les électrodes (Örün et Akbulut, 2019). Les artefacts présents dans le signal, comme les mouvements oculaires et musculaires ou l'activité électrique provenant de l'environnement, ont été retirés à l'aide du logiciel Brain Vision Analyser™. Pour ce faire, nous avons d'abord reréférencé l'ensemble du signal capté par les électrodes à partir de la moyenne des mastoïdes (électrodes TP9 et TP10) afin de préserver la latéralité du signal (Lei et Liao, 2017). Nous avons ensuite appliqué un filtre pour ne conserver que les fréquences situées entre 1,1 et 30 Hertz, puis nous avons identifié les mouvements oculaires grâce à l'analyse en composantes indépendantes du module *Ocular Correction ICA Filter*. Cette étape permet de retirer du signal le voltage produit par les clignements et les saccades oculaires pour ne conserver que le voltage produit par la dépolarisation synchronisée des neurones pyramidaux (Demanuele et al., 2013; Heisz et McIntosh, 2013). À partir du signal filtré, nous avons appliqué un nouveau filtre afin de retirer les segments (en ms) qui ne semblent pas correspondre à de l'activité cérébrale, comme des variations de voltage trop marquées entre deux mesures continues. Une vérification visuelle des données filtrées a subséquemment été conduite afin de s'assurer que le signal subsistant n'est pas corrompu par des artefacts résiduels ou des déplacements d'électrodes. Avec les données épurées restantes, nous avons isolé les électrodes d'intérêts (Fz, Cz, Pz) et effectué deux transformations de Fourier rapide, permettant ainsi d'estimer la fréquence électrique, à savoir la puissance spectrale alpha (8–12 Hz) et thêta (4–8 Hz) à partir de l'amplitude électrique, donc du voltage capté par les électrodes (Scharinger et al., 2017). Les données ont été traitées dans le logiciel MATLAB afin produire une mesure continue pouvant être exportée dans Observer XT™. Cette mesure, l'augmentation de puissance spectrale thêta (Fz) par rapport à la diminution de puissance spectrale alpha (Pz), est représentée comme un signal continu et variant dans le temps en fonction du nombre d'éléments maintenus et traités simultanément en MDT. L'estimation de la fréquence électrique requiert néanmoins un minimum de fréquence d'échantillonnage du signal, le ratio de désynchronisation adapté de Holm (2009) et développé à Neurolab permet d'obtenir une lecture à la seconde, donc d'obtenir une estimation %DRE à chaque seconde (Mercier et al., 2012; Mercier & Bédard, 2016).

Nous avons ensuite standardisé en score Z les scores bruts de chaque participant par rapport à sa moyenne de CC. L'état de repos (activité cognitive passive, la RéfB) et le traitement cognitif imposé par la rétroaction (une CC élevée référant à la moyenne de la tâche de *n-back*) sont propres à chaque participant, le %DRE en score Z indique le %DRE par rapport à sa distance à la moyenne de %DRE exprimée en écart-type, permettant ainsi la comparaison entre les participants pour un niveau de rétroaction (Haccoun et Cousineau, 2014). Avec le score Z, il devient alors possible de mesurer pour un niveau de rétroaction s'il se distingue des autres niveaux à la fois pour un participant et pour le groupe et ainsi vérifier l'influence du niveau de rétroaction sur la CC (en écart-type) pour l'ensemble de l'échantillon. De plus, la standardisation des mesures de CC nous a permis de repérer des données extrêmes, donc des lectures de CC possiblement faussées par l'enregistrement d'un voltage ne provenant pas de l'activité cérébrale et ayant échappé au filtrage des données. Nous avons de ce fait procédé à une winsorization des données afin de remplacer les données extrêmes (score inférieur à -3,1 ou supérieur à 3,1) par des valeurs égalant la moyenne additionnée ou soustraite de trois écarts-types selon si le score Z était supérieur ou inférieur à zéro (Frey, 2022).

3.4.3 Superposition de la vidéo et de la mesure de charge cognitive

Afin de superposer la mesure de CC sur la vidéo, il faut d'abord les synchroniser. La caméra ayant une résolution de 30 images par seconde, la synchronisation maximale entre les deux signaux (vidéo et EEG) est donc de 33 millisecondes. Puisque pour chaque participant nous avons débuté l'enregistrement vidéo avant celui de l'EEG, nous avons placé le temps zéro de la mesure de CC sur Observer XT™ en fonction du début de l'enregistrement de l'EEG tel que vu sur la vidéo (la caméra filmait l'activation et l'arrêt de l'enregistrement EEG). Nous nous sommes assurés de la qualité de la synchronisation en regardant la fin de l'enregistrement EEG sur la vidéo, en vérifiant que la dernière mesure de CC correspond bien à l'arrêt de l'enregistrement tel qu'observé sur la bande vidéo. Finalement, nous avons extrait 33 fichiers CSV, chaque fichier indiquant la mesure de CC à chaque seconde et lorsqu'une rétroaction était donnée, le niveau (tâche, processus, autorégulation ou soi) et la durée de celle-ci.

3.4.4 Plan d'analyse

3.4.4.1 Définition des trois variables dépendantes

Mesurer la CC durant la rétroaction nous offre une vision partielle de l'impact de celle-ci, car nous ne pouvons pas contrôler l'activité cérébrale du participant avant la rétroaction ou identifier les facteurs internes et externes agissant sur la mesure. Pour bien décrire l'effet des niveaux de rétroaction sur la CC,

notre premier objectif, nous avons ainsi défini trois variables dépendantes. La première réfère à la mesure de CC pendant la rétroaction (Var_rétro), donc la moyenne de CC associée aux quatre niveaux de rétroaction et cherche à établir si les niveaux se différencient entre eux. La deuxième vise à vérifier l'effet spécifique du niveau de rétroaction en soustrayant la CC pendant la référence de base (RéfB) à la mesure de CC pendant la rétroaction (Var_base). Nous souhaitons examiner avec cette variable si certains niveaux augmentent ou diminuent la CC par rapport à une utilisation naturelle de la MDT, donc lorsque l'apprenant effectue des tâches professionnelles élémentaires, mais sans interaction avec l'enseignant. La troisième cible la différence entre la CC précédant immédiatement la rétroaction (quatre secondes) et la CC durant le traitement de la rétroaction (Var_diff). Cette variable permet d'étudier si le niveau de rétroaction occasionne une augmentation ou une diminution de la CC par rapport à la charge expérimentée par l'apprenant juste avant la rétroaction, donc indépendamment si la CC était en train d'augmenter ou de diminuer ou si elle était haute ou basse. La durée de quatre secondes ne repose pas sur une assise théorique, elle a été établie lors du traitement des données. Puisque plusieurs rétroactions étaient parfois données au participant de manière concurrente pour une même action ou situation, la durée de quatre secondes permettait d'éviter des chevauchements entre le moment précédent la rétroaction et la rétroaction précédent ce moment.

3.4.4.2 Le modèle d'analyse multiniveaux linéaires

L'analyse des données a été effectuée à partir du logiciel SPSS 29 de IBM. Nous avons déterminé que l'analyse multiniveaux est préférable à l'ANOVA, l'analyse des modérateurs dans le cadre théorique a fait ressortir la structure nichée des données, ce qui n'est pas pris en compte dans une ANOVA (Lazega & Snijders, 2016). En effet, le niveau de rétroaction seul ne peut expliquer la variation de CC dans le temps puisque les caractéristiques des participants, leur niveau d'expertise par exemple, peuvent influencer l'action de la variable indépendante sur la variable dépendante. De plus, le nombre de rétroactions données varie d'un participant à l'autre, les rétroactions étant offertes en fonction des questions de l'étudiant ou des observations de l'enseignant-chercheur. Les modèles multiniveaux ont la capacité de traiter des données déséquilibrées, parfois manquantes et de tenir compte de l'hétérogénéité de la variance entre les mesures (Bressoux, 2010). Il faut un minimum de 20 participants pour pouvoir procéder à une analyse multiniveaux, cette condition est ici respectée, il est toutefois important d'avoir un maximum d'observation sur le niveau inférieur, les rétroactions dans notre étude (Hox, 2010).

La construction du modèle est faite en fonction de la structure hiérarchique des données. Nous retrouvons donc au niveau inférieur les rétroactions offertes à l'étudiant, ce niveau n'est pas indépendant, la relation avec la CC dépend du niveau supérieur, les sujets (session et années d'expérience). Les effets fixes que nous avons intégrés au modèle proviennent de notre cadre théorique, à savoir le niveau de rétroaction, la session, le nombre d'années d'expérience et les moyennes de CC à la RéfB et durant la tâche de *n-back*. L'effet aléatoire que nous avons intégré au modèle, la constante, est le sujet. Pour répondre aux objectifs de cette recherche, la première étape consiste à tester la présence d'effets d'interaction entre les rétroactions et les modérateurs. Pour les interactions significatives, la deuxième étape permet de comparer les niveaux de rétroaction en vérifiant les contrastes entre ceux-ci et le modérateur impliqué et en comparant les moyennes réelles de CC associée.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

Les objectifs de cette recherche corrélacionnelle sont de décrire la relation entre le niveau de rétroaction verbale utilisé par l'enseignant en atelier pratique et la charge cognitive associée au traitement de cette rétroaction par l'étudiant tout en vérifiant si cette relation est stable durant le développement d'une compétence. Nous présenterons dans ce chapitre les résultats des différentes analyses statistiques que nous avons conduites afin de répondre aux objectifs la recherche. Nous débuterons par certaines données descriptives sommaires, puis nous exposerons la relation entre le niveau de rétroaction et la charge cognitive à partir d'analyses multiniveaux regroupant les trois variables dépendantes (Var_rétro, Var_base et Var_diff) nous permettant de bien cerner cette relation supposée.

4.1 Analyses descriptives des données

Le nombre de rétroactions offertes aux participants découle des observations de l'enseignant-chercheur durant la tâche et fluctue d'un participant à l'autre. Les participants ont reçu entre 15 et 43 rétroactions ($M = 29$, écart-type = 6) durant chaque expérimentation. La durée de l'expérimentation, mesurée à partir de l'enregistrement de l'EEG de chaque participant, varie selon le temps d'exécution de la tâche et le nombre de niveaux de rétroaction offert à celui-ci. Nous avons obtenu des enregistrements variant de 1086,40 secondes à 1885,15 secondes ($M = 1368,26$, écart-type = 149,12). Lors du traitement du signal EEG, certaines périodes ont été retirées, car trop contaminées ($M = 63,28$ secondes, écart-type = 47,06). Nous avons aussi exclu un participant dont les données étaient corrompues par de multiples artefacts ne permettant pas d'obtenir une mesure continue fiable.

Le tableau 4.1 comptabilise les différents niveaux de rétroaction, codés à partir du modèle de Hattie et Timperley (2007), offerts aux étudiants ($n = 32$) durant la tâche d'apprentissage, en fonction de leur session respective.

Tableau 4.1 Nombres de rétroactions données aux étudiants en fonction du niveau et de la session

Niveaux de rétroaction	Session		Total (%)
	1	3	
Processus	152	141	293 (31,4%)
Régulation	54	59	113 (12,1%)
Soi	38	43	81 (8,7%)
Tache	212	234	446 (47,8%)
Total	456	477	933 (100%)

Ainsi, pour procéder aux analyses multiniveaux, nous disposons de 933 observations réparties sur 32 sujets.

4.2 Analyses inférentielles des données

Le modèle d'analyse multiniveaux linéaire avec ordonnée aléatoire contribue, dans un premier temps, à vérifier l'existence d'un effet d'interaction entre le niveau de rétroaction (effet fixe, niveau inférieur) et les caractéristiques du participant (effet aléatoire, niveau supérieur). Ensuite, les moyennes réelles des mesures de CC associées aux effets d'interaction significatifs nous permettront de montrer la direction de l'effet. Les analyses multiniveaux ne permettent pas toutefois d'obtenir une mesure de la puissance statistique du test utilisé. Cependant, la probabilité de commettre une erreur de type I est relativement faible étant donné que le niveau supérieur contient plus de 20 sujets ($n = 32$) et que le niveau inférieur comporte près de 1000 observations ($n = 933$) (Hox, 2010; Snijders, 2005).

4.2.1 Effets du niveau de rétroaction sur la charge cognitive pendant la rétroaction

La variable dépendante de CC pendant la rétroaction (Var_rétro) vise à distinguer si les niveaux diffèrent entre eux pendant que la rétroaction est donnée au participant, donc de vérifier si certains niveaux augmentent davantage la CC que d'autres. Les coefficients de détermination fournissent respectivement une variance expliquée marginale (effet fixe) de 3,9% et conditionnelle (effet fixe et effet aléatoire combiné) de 4,3% (Nakagawa & Schielzeth, 2013). L'analyse des effets fixes indique une interaction significative entre le niveau de rétroaction et la session de l'étudiant ($F_{3; 877,057} = 2,80; p < ,039$). Le tableau 4.2 présente l'estimation des effets fixes par rapport à la catégorie de référence (rétroaction sur la tâche de première session).

Tableau 4.2 Estimation des effets fixes des niveaux de rétroaction et de la session sur la CC pendant la rétroaction

Paramètre	Estimation	Erreur		t	Sig.	Intervalle de confiance à 95 %	
		standard	ddl			Limite inférieure	Limite supérieure
[Session=1] * [Rétroaction=Processus]	,478	,196	869,508	2,438	,015	,093	,862
[Session=1] * [Rétroaction=Régulation]	-,240	,292	873,649	-,822	,411	-,812	,333
[Session=1] * [Rétroaction=Soi]	,194	,336	882,822	,577	,564	-,465	,853

Les rétroactions sur le processus (RP) données aux étudiants de première session se distinguent de la référence ($t_{869, 508} = 2,44$; $p < 0,015$). Le tableau 4.3 nous renseigne sur les moyennes réelles de CC découlant du niveau de rétroaction en fonction de la session. Les comparaisons appariées des moyennes réelles dénotent une différence de CC significative entre les RT et les RP chez les étudiants de première session seulement (différence de 0,22 écart-type, $p < ,046$). La moyenne des scores Z égalant 0, nous pouvons affirmer que les RT entraînent, en moyenne, moins de CC que les RP en 1^{re} session.

Tableau 4.3 Moyennes réelles des mesures de CC pendant la rétroaction en fonction du niveau de rétroaction et de la session

Rétroaction	Session	Moyenne ^a	Erreur		Intervalle de confiance à 95 %	
			standard	ddl	Limite inférieure	Limite supérieure
Processus	1	,105	,063	165,933	-,019	,229
	3	-,007	,065	172,463	-,134	,121
Régulation	1	-,124	,105	606,773	-,329	,082
	3	,071	,102	567,756	-,128	,271
Soi	1	,054	,134	765,047	-,210	,318
	3	-,013	,131	665,295	-,271	,245
Tâche	1	-,110	,053	85,657	-,214	-,005
	3	,077	,054	87,981	-,031	,184

a. Les covariables figurant dans le modèle sont évaluées à l'aide des valeurs suivantes : années d'expérience = 2,21, moyenne de la RéfB = ,054.

4.2.2 Effets du niveau de rétroaction sur la charge cognitive pendant la rétroaction et en fonction de la référence de base

La variable dépendante de CC pendant la rétroaction compare la mesure de CC à toutes les rétroactions données durant l'expérimentation. La deuxième variable dépendante, la CC pendant la rétroaction, mais en fonction de la référence de base (Var_base), situe chaque participant par rapport à son activité cognitive alors qu'il est en action, en soustrayant à la CC pendant la rétroaction la moyenne obtenue pendant la période de référence. Les coefficients de détermination fournissent respectivement une variance expliquée marginale de 4,7% et conditionnelle de 13,9%. L'analyse des effets fixes indique aussi une interaction significative entre le niveau de rétroaction et la session de l'étudiant ($F_{3; 864,401} = 2,87; p < ,036$). Le tableau 4.4 présente l'estimation des effets fixes.

Tableau 4.4 Estimation des effets fixes des niveaux de rétroaction et de la session sur la CC pendant la rétroaction et en fonction de la référence de base

Paramètre	Estimation	Erreur standard	ddl	t	Sig.	Intervalle de confiance à 95 %	
						Limite inférieure	Limite supérieure
[Session=1] * [Rétroaction=Processus]	,483	,197	861,667	2,459	,014	,098	,869
[Session=1] * [Rétroaction=Régulation]	-,248	,293	862,586	-,848	,397	-,823	,327
[Session=1] * [Rétroaction=Soi]	,183	,339	867,990	,541	,589	-,482	,849

Pour cette deuxième variable dépendante, les RP données aux étudiants de première session se distinguent aussi de la référence, les RT en première session ($t_{861,667} = 2,46; p < 0,014$). Le tableau 4.5 nous renseigne sur les moyennes de CC résiduelles après soustraction de la référence de base et découlant du niveau de rétroaction en fonction de la session. En comparant les moyennes réelles (comparaisons appariées), nous observons une différence de CC significative entre les RT et les RP chez les étudiants de première session seulement (différence de 0,22 écart-type, $p < 0,037$). Nous pouvons donc avancer que les RT occasionnent en général une CC qui est plus basse qu'une activité cognitive passive, alors que les RP induisent une CC légèrement supérieure à cette condition, mais qu'en première session.

Tableau 4.5 Moyennes réelles des mesures de CC par rapport à la référence de base de chaque participant pendant la rétroaction en fonction du niveau de rétroaction et de la session

Rétroaction	Session	Moyenne ^a	Erreur		Intervalle de confiance à 95 %	
			standard	ddl	Limite inférieure	Limite supérieure
Processus	1	,028	,087	54,821	-,147	,202
	3	,089	,54617	-,236	,122	-,057
Régulation	1	-,195	,121	184,893	-,434	,043
	3	,013	,119	161,293	-,222	,248
Soi	1	-,004	,148	343,901	-,295	,287
	3	-,048	,147	304,419	-,336	,241
Tâche	1	-,194	,080	39,222	-,356	-,032
	3	,022	,082	39,112	-,143	,188

a. Les covariables figurant dans le modèle sont évaluées à l'aide des valeurs suivantes : années d'expérience = 2,21

4.2.3 Effets du niveau de rétroaction sur la différence de charge cognitive pendant et précédant la rétroaction

La troisième variable dépendante que nous avons analysée cherche à déterminer si la rétroaction augmente ou abaisse la CC de l'apprenant en fonction de la moyenne de CC des quatre secondes précédant la rétroaction (Var_diff). Le résultat de cette soustraction permet donc de mesurer si le soutien de l'enseignant augmente ou diminue la CC de l'apprenant au cours de la tâche. Les coefficients de détermination fournissent respectivement une variance expliquée marginale de 4,3% et conditionnelle de 5,3%. L'analyse des effets fixes indique derechef une interaction significative entre le niveau de rétroaction et la session de l'étudiant ($F_{3; 855,489} = 2,83; p < ,038$). Le tableau 4.6 présente l'estimation des effets fixes.

Tableau 4.6 Estimation des effets fixes des niveaux de rétroaction et de la session sur la différence de CC pendant et avant la rétroaction

Paramètre	Estimation	Erreur standard	df	t	Sig.	Intervalle de confiance à 95 %	
						Limite inférieure	Limite supérieure
[Session=1] *	,582	,262	849,871	2,219	,027	,067	1,096
[Rétroaction=Processus]							
[Session=1] *	-,235	,390	852,528	-,603	,547	-1,002	,531
[Rétroaction=Régulation]							
[Session=1] *	,773	,434	860,566	1,780	,076	-,080	1,625
[Rétroaction=Soi]							

Pour cette troisième variable dépendante, les RP données aux étudiants de première session se distinguent à nouveau de la référence ($t_{849,871} = 2,22; p < ,027$). Le tableau 4.7 présente la différence de CC pendant et avant la rétroaction, en fonction du niveau de rétroaction et de la session. Les comparaisons appariées des moyennes réelles révèlent une différence significative entre les RT et les RP chez les étudiants de première session seulement (différence de 0,23 écart-type, $p < 0,028$). Il apparaît donc que les RT diminuent la CC de l'apprenant par rapport à la mesure de CC précédant la rétroaction, alors que les RP augmentent la CC et que cet effet n'est pas maintenu chez les étudiants de troisième session.

Tableau 4.7 Moyennes réelles de la différence de CC pendant et précédant la rétroaction en fonction du niveau de rétroaction et de la session

Rétroaction	Session	Moyenne ^a	Erreur standard	ddl	Intervalle de confiance à 95 %	
					Limite inférieure	Limite supérieure
Processus	1	,137	,085	133,950	-,031	,305
	3	,012	,086	133,582	-,158	,182
Régulation	1	-,066	,141	540,276	-,344	,212
	3	,190	,132	466,913	-,070	,450
Soi	1	,248	,176	716,781	-,099	,594
	3	-,166	,172	615,255	-,503	,171
Tâche	1	-,095	,072	69,183	-,238	,048
	3	,103	,072	68,803	-,041	,248

a. Les covariables figurant dans le modèle sont évaluées à l'aide des valeurs suivantes : années d'expérience = 2,21, moyenne de la RéfB = ,053, moyenne à la tâche de Nback = ,011

Les résultats des analyses multiniveaux linéaires avec ordonnée aléatoire nous permettent de répondre partiellement aux objectifs de la présente recherche. Les RT et les RP se sont distinguées à travers les trois variables dépendantes que nous avons analysées, respectivement, elles diminuent et augmentent la CC de l'apprenant. De plus, cet effet n'est visible qu'en première session, ce qui répond de manière plus formelle au deuxième objectif : la charge cognitive associée au traitement des niveaux de rétroaction des apprenants diffère entre les étudiants de première et de troisième session.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Notre question de recherche vise à décrire de quelles façons la rétroaction utilisée en atelier pratique influence la charge cognitive de l'apprenant en cuisine en temps réel. Afin de répondre à ce questionnement, nous avons formulé différents niveaux de rétroaction à deux cohortes d'étudiants en contexte d'apprentissage authentique et avons mesuré la CC des apprenants. Les résultats obtenus seront discutés dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons ensuite les limites de cette recherche, puis nous concluons avec les implications scientifiques et sociales possibles.

5.1 Discussion des résultats

Le contexte d'apprentissage en atelier pratique d'un métier induit une multitude d'éléments à prendre en compte pour l'étudiant (sécurité personnelle, distractions sonores, planification de la tâche dans le temps ou précision du geste par exemple). La rétroaction s'ajoute aux éléments préalablement traités en mémoire de travail ; son action doit donc bénéficier à la construction de schémas mentaux et non nuire à ce processus cognitif. La littérature scientifique s'intéressant aux rétroactions met de l'avant la difficulté à relier les niveaux de rétroactions et les facteurs cognitifs favorisant l'apprentissage, des modérateurs influencent considérablement l'efficacité de la rétroaction (Fyfe et Rittle-Johnson, 2016; Van der Kleij et al., 2012; Wang et al., 2019; Wisniewski et al., 2020). Les différences individuelles concernant les connaissances préalables sur un sujet d'apprentissage, donc l'accessibilité à des schémas mentaux pertinents et préexistants selon la théorie de la charge cognitive (TCC), influencent significativement l'effet positif ou négatif de la rétroaction (Bangert-Drowns et al., 1991; Fyfe & Rittle-Johnson, 2016; Mason & Bruning, 2001; Moreno, 2004; Stevenson, 2017), que l'apprenant soit conscient ou non des connaissances préalables qu'il possède (Shirah & Sidney, 2023). La TCC émet des hypothèses sur les différents types de charges impliqués dans ce traitement (particulièrement la charge intrinsèque), l'effet de renversement dû à l'expertise fournissant des résultats empiriques allant en ce sens (Buchin & Mulligan, 2022; Chen et al., 2017). Les résultats des analyses multiniveaux obtenus corroborent certaines des assertions de la TCC et permettent de mieux comprendre, quoique d'une façon limitée, la relation entre le niveau de rétroaction et la charge cognitive, surtout en tenant compte du niveau d'expertise de l'apprenant.

Les effets d'interaction entre la rétroaction et différents modérateurs sont solidement établis (Kluger & DeNisi, 1996; Mory, 2004; Van der Kleij et al., 2015; Wisniewski et al., 2020), de là la difficulté à émettre

des hypothèses sur les effets de la rétroaction étudiée comme variable unique (Wang et al., 2019). Notre recherche a établi un effet d'interaction en lien avec le niveau d'expertise ; la seule interaction significative concerne le niveau de rétroaction et la session de l'apprenant. Cet effet est significatif pour les trois variables dépendantes que nous avons définies : la CC durant la rétroaction (Var_rétro), la CC durant la rétroaction comparée à la référence de base (Var_base) et la CC durant la rétroaction comparée à la CC précédant la rétroaction (Var_diff). Le niveau de rétroaction seul ne peut expliquer la variation de CC (effet simple non significatif et faible pourcentage de la variance expliquée), mais lorsque nous considérons la session de l'apprenant, les rétroactions sur la tâche et le processus se distinguent. La comparaison des moyennes réelles de CC pour ces niveaux de rétroaction indique que la RP augmente davantage la CC que la RT pour les étudiants de première session, et ce pour les trois variables dépendantes. Cette différence de CC ne peut être interprétée de façon linéaire entre les trois variables, les résultats que nous avons obtenus, bien que distinguant systématiquement les RT et les RP pour les étudiants de première session, indiquent trois effets distincts du niveau de rétroaction sur la CC de l'étudiant.

5.1.1 Résultats en fonction des trois variables dépendantes

La Var_rétro compare la CC durant chaque rétroaction, cette mesure standardisée (score Z) découle de la moyenne enregistrée durant la tâche, donc résultante des actions cognitives de l'apprenant durant toute la tâche d'apprentissage. Nous pouvons avancer que sur un continuum d'apprentissage en atelier pratique, les RT et le RP se situent de part et d'autre de la moyenne ; les RT engendreraient une utilisation plus faible de la mémoire de travail (MDT), alors que les RP induiraient une utilisation plus élevée. Nous observons aussi que les RT diminuent la CC lorsqu'elle est mesurée en soustrayant la référence de base à la CC mesurée pendant la rétroaction (Var_base). Les RT diminueraient donc davantage la CC que les RP par rapport à une activité cognitive que l'on pourrait qualifier de neutre, donc indépendamment des éléments traités par l'apprenant durant une tâche authentique. Le dispositif de collecte que nous avons mis en place permet ainsi de détecter des variations fines de CC, même lorsque l'étudiant est actif dans l'activité d'apprentissage, donc que la rétroaction offerte n'est qu'un stimulus supplémentaire à traiter. Puisque cet effet n'est observable qu'en première session, nous pouvons supposer que le niveau de rétroaction informant l'apprenant sur sa façon de faire et les moyens d'améliorer le résultat (RP) exige davantage de manipulations en MDT chez les novices que chez les étudiants ayant déjà une certaine maîtrise de la technique à reproduire qu'un niveau de rétroaction n'ayant qu'une visée corrective (RT). Lorsque nous vérifions l'impact de la rétroaction par rapport à une période de quatre secondes la précédant (Var_diff), donc nonobstant que la charge initiale soit haute ou basse ou que la mesure soit en

train d'augmenter ou de diminuer, les RT entraîneraient une baisse de CC et les RP indiqueraient une augmentation, ce qui n'est pas observable avec les rétroactions sur l'autorégulation (RA) et le soi (RS). Sans affirmer que les autres niveaux de rétroaction n'ont pas d'effet sur la MDT, il est étonnant que seuls ces deux niveaux produisent cet effet. Les rétroactions sur l'autorégulation sont complexes et font appel à différentes stratégies métacognitives comme l'autorégulation et l'anticipation (Bégin, 2008; Tardif, 2007) ; il aurait donc été raisonnable d'escompter une augmentation significative de la CC durant ces rétroactions, surtout que le %DRE ne peut que difficilement distinguer les éléments maintenus en MDT des stratégies de résolution de problème mis en place par l'apprenant (Scharinger et al., 2017). Cette augmentation instantanée de la CC comparée à la charge précédant la RP et la diminution observée lors de la RT n'est visible que chez les étudiants de première session, un effet de renversement semble opérer sur le traitement cognitif relié à ces niveaux précis entre les étudiants des deux groupes.

5.1.2 Résultats en fonction des trois modérateurs influençant l'effet des rétroactions

Dans le chapitre 2 présentant le cadre théorique de la présente étude, nous avons synthétisé (tableau 2.2) l'effet des niveaux de rétroaction sur l'apprentissage en fonction du niveau d'expertise, de la complexité de l'apprentissage et du moment où elles sont données. Nous pouvons faire une relecture de cette synthèse sous l'angle de la CC et des résultats de l'étude. Les RP ont un effet positif sur la performance, supérieur aux RT, autant pour les novices que pour les experts (Hattie & Timperley, 2007; Wisniewski et al., 2020) ; la CC davantage élevée induite par la rétroaction sur le processus n'aurait par conséquent pas, ou peu, d'impact négatif sur la performance. Lorsque nous analysons la complexité de la tâche, les RP ont un effet positif pour l'apprentissage de tâche simple, alors qu'elles ont un effet négatif sur les tâches complexes ; les RT ont un effet positif dans les deux cas. Selon la TCC, les étudiants qui ont peu de connaissances préalables sur l'objet d'apprentissage expérimentent une CC élevée, car ils ne peuvent accéder à des schémas mentaux complexes pour traiter et assimiler les nouvelles informations, la récupération en MDT d'une multitude de schémas simples engorge la MDT (Sweller et al., 1998). Nos résultats vont dans ce sens, une augmentation de la CC par une RP pourrait attester d'une activation de schémas spécifiques à la tâche, donc la rétroaction atteint son but, mais sans surcharger la CC de l'apprenant. Cela permet aussi d'envisager que les RP ont un effet négatif sur l'apprentissage des tâches complexes chez les novices, car elles induiraient l'activation d'un nombre important de schémas non agglomérés spécifiques à la tâche, dépassant ainsi les capacités de la MDT, alors que l'expert active peu de schémas agglomérés pour effectuer la même tâche.

Concernant les RT, la CC que nous avons mesurée pour les trois variables semble indiquer que les activations de schémas sont limitées (CC basse) et que la complexité de la tâche importe peu sur la performance, la MDT dispose des ressources nécessaires pour effectuer la tâche tout en traitant la rétroaction. Les rétroactions que nous avons fournies aux participants étaient toujours immédiates, les RP sont associées à une augmentation de la CC par rapport au moment précédant la rétroaction. Ceci peut être explicable par la nature de la RP qui vise spécifiquement les procédures préalables nécessaires à la bonne exécution de la tâche. La TCC et le modèle de Hattie et Timperley (2007) permettent d'interpréter nos résultats sur l'augmentation immédiate de la CC comme suit : les RP activeraient les schémas préalablement encodés en MLT correspondant aux connaissances procédurales requises pour effectuer la tâche. Pour les apprentissages procéduraux, ce serait d'après les résultats le niveau qui pointerait avec la plus grande précision sur ce que l'apprenant sait déjà et ce qu'il doit faire pour améliorer sa performance. Les RT visent davantage un niveau correctif qui n'amène pas particulièrement l'apprenant à actualiser ce qu'il sait déjà ; il y a un effet positif sur la performance, mais pas de trace visible de complexification de schémas mentaux. Les RA sont des rétroactions complexes, conceptuellement semblables à la RP (Van der Kleij et al., 2012) ; elles font appel à des stratégies de résolution de problèmes par exemple, qui activent des séquences cognitives qui peuvent inclure ou non les schémas requis pour la tâche. Cette charge métacognitive n'est peut-être pas mesurable avec le %DRE, tout comme les processus d'inhibition qui peuvent être activés de façon consciente ou non (Loomes et al., 2023).

5.1.3 Résultats en fonction de l'effet de renversement dû à l'expertise.

L'effet de renversement dû à l'expertise (ERE) semble expliquer les résultats parfois contradictoires entre certaines études portant sur les rétroactions, particulièrement en lien avec les RT (Fyfe & Rittle-Johnson, 2016; Kalyuga, 2007; Moreno, 2004). Les RT ont un effet positif sur la performance des novices, mais négatif lorsque ceux-ci ont appris des stratégies de résolution de problèmes en lien avec l'objet d'apprentissage ; pour les étudiants ayant une certaine expertise, l'effet est négatif. La TTC peut hypothétiser que l'effet équivoque chez les novices découle de l'ERE, l'apprenant novice qui utilise des stratégies n'est pas un novice cognitif, il déploie les stratégies de l'expert, l'effet positif de la RT bascule vers un effet négatif, comme pour l'expert. Nous n'avons pas contrôlé ce phénomène dans notre recherche, mais l'effet de réduction de la CC associée à la RT par rapport à la RP pour les trois variables n'est visible qu'en première session. La CC mesurée pour la Var_rétro semble indiquer que, celle-ci étant située sous la moyenne de zéro, la RT abaisse la CC de l'apprenant, qu'elle permet donc à celui-ci de diminuer les manipulations cognitives requises à la tâche. Elle aide à l'apprentissage en visant un niveau

correctif, qui bien qu'étant moins efficace que la RP (Wisniewski et al., 2020), laisse davantage d'espace en MDT que la RP, celle-ci étant improductive pour l'apprentissage de tâches complexes.

L'absence de persistance de l'effet sur la CC des RP entre les étudiants de première et troisième session semble aussi indiquer un effet de renversement. En effet, la TCC stipule que l'interactivité des éléments correspond au nombre d'éléments devant être traités simultanément en MDT, car logiquement regroupés, lors d'un apprentissage (Chen et al., 2018). L'interprétation de nos résultats laisse entrevoir que les RP activeraient chez l'apprenant en action plusieurs séquences reliées entre-elles, donc ayant une interactivité forte (Chen et al., 2017; Kalyuga, 2007; Sweller et al., 2019). Il n'est donc pas inattendu d'observer une augmentation de la CC instantanée (Var_diff) pendant la RP, l'apprenant actualisant les procédures nécessaires à l'exécution de la tâche lui permettant de confirmer, rejeter ou modifier une action préalable, condition essentielle de la définition que nous avons proposée pour la rétroaction verbale en atelier pratique. L'absence d'augmentation de CC pour les étudiants de troisième session peut être interprétée sous l'angle du renversement dû à l'expertise : les schémas actualisés en MDT ont maintenant une faible interactivité, car ils se sont agglomérés en unités procédurales complexes, l'apprentissage permettant de réduire le nombre d'éléments à traiter en MDT (Sweller, 1988; Tardif, 2007). Les construits neurophysiologiques associés aux ondes alpha peuvent aussi expliquer ce phénomène et laisse entrevoir une autre hypothèse (Martínez Vásquez et al., 2023; Ortiz et al., 2023). L'absence d'augmentation de CC chez les étudiants de troisième session découle de la baisse d'interactivité entre les schémas emmagasinés en MLT (classification cognitive plus précise des éléments), l'apprenant récupère ainsi moins de schémas en MDT en réaction à la RP, le développement de l'expertise permettant de prioriser les activations cognitives nécessaires à la tâche et non tous les éléments logiquement regroupés. Le renversement dû à l'expertise ne serait alors pas expliqué par la complexification des schémas mentaux, mais bien par une activation davantage précise, voire économe des ressources cognitives.

5.2 Limites de la recherche

Les résultats de cette recherche doivent être analysés avec précaution. Les participants ont été soumis à de multiples rétroactions, davantage que dans un cours de cuisine régulier. Ainsi, il est possible que cette accumulation de rétroactions ait eu un impact sur la charge perçue et cumulée pendant la tâche. Cette limite est atténuée par le fait que nous nous sommes intéressés à la charge instantanée, mais nous ne pouvons présumer l'absence d'un effet additif provenant d'une certaine fatigue cognitive se manifestant

principalement avec les rétroactions sur le processus. Le modèle de Hattie et Timperley (2007) que nous avons utilisé pour catégoriser les niveaux de rétroaction a été utilisé avec succès dans différentes études (Brooks et al., 2019; Brown et al., 2012; Gan, 2011; Harris et al., 2015), il apparaît toutefois qu'il est parfois difficile de distinguer une rétroaction visant le processus de l'autorégulation (RP et RA). Ces deux niveaux sont jumelés dans d'autres modèles de rétroaction (Mason & Bruning, 2001; Van der Kleij et al., 2012), il se pourrait que même en étant bien identifiés selon le modèle de Hattie et Timperley (2007), certaines mesures de CC ayant été attribuées comme des RP ou des RA aient été traitées différemment par l'apprenant, ce qui peut induire une erreur de type 2 (les RA abaissent la CC des étudiants de 1^{re} session de façon non significative pour les trois variables dépendantes, cela peut venir du fait que des RP identifiées RA contaminent les analyses statistiques). Le rôle de l'enseignant-chercheur dans le dispositif de collecte peut aussi biaiser les rétroactions, sachant que tous les niveaux de rétroaction devaient être présentés aux participants et que certains sont plus difficiles à émettre naturellement (les RA particulièrement), certaines rétroactions n'ont peut-être pas été traitées convenablement par les participants qui ne comprenaient pas nécessairement le but de l'intervention de l'enseignant.

Les recherches utilisant des outils de mesure provenant des neurosciences sont souvent confrontées à un manque de puissance statistique (Alday, 2019). La recherche en éducation ne fait pas exception, les difficultés inhérentes au dispositif de collecte (l'EEG dans notre recherche) augmentent la difficulté à recruter un grand nombre de participants (Örün & Akbulut, 2019). Même si nous avons un nombre de participants ($n = 32$) suffisant pour procéder aux analyses multiniveaux (Hox, 2010), la taille de l'échantillon reste faible compte tenu de la variance importante que nous avons obtenue avec la mesure de charge cognitive. La volonté de l'équipe de recherche à conduire l'expérimentation en milieu naturel, en atelier pratique plutôt que dans un laboratoire de recherche, contribue à la création d'artefacts dans les données de l'EEG (Xu et al., 2022) et réduit le contrôle des interactions avec le participant, celui-ci effectuant la tâche sans directives expérimentales particulières (Horr et al., 2022). L'activité cérébrale des participants ne peut être contrôlée par l'enseignant-chercheur, le fonctionnement électrique du cerveau demeure énigmatique à bien des niveaux et ce que nous associons à des fonctions cognitives précises est enchâssé dans des activations complexes, le pourcentage de variance expliquée par la variable indépendante (les niveaux de rétroaction) demeure relativement faible dans notre étude, de 4% à 14% environ. De même, le %DRE est un index scientifiquement admis lorsque les tâches mnésiques étudiées proviennent de tâches standardisées (Antonenko et al., 2014; Grimes et al., 2008; Holm et al., 2009; Scharinger et al., 2017). La charge que nous souhaitons mesurer ne visait pas à déterminer une mesure associée à un nombre précis

d'items maintenus en MDT (trois chiffres par exemple), c'est davantage la variation de la mesure continue en réponse à la rétroaction qui nous intéresse et cette variation peut parfois être dissimulée dans le signal obtenu, certains effets significatifs n'ayant pu être observés. Si la standardisation des résultats en score Z nous a permis de comparer les participants entre eux, cette standardisation nous semble davantage circonspecte pour l'analyse de notre première variable dépendante (Var_rétro) que pour les deux autres (Var_base et Var_diff). Les soustractions de score Z que nous avons faites pour obtenir des mesures relatives de CC peuvent aussi avoir atténué l'impact de la variable indépendante (Penney, 2023).

Le choix des variables dépendantes découle de nos objectifs de recherche et non d'une littérature scientifique abondante. Notre recherche étant exploratoire, et somme toute innovante, car mesurer la CC d'apprenant en action dans un milieu réel oblige le transfert de construits théoriques et expérimentaux dans un environnement non contrôlé, nos variables n'ont pas été testées dans d'autres recherches. Il se pourrait par exemple que la période de quatre secondes précédant la rétroaction et découlant du traitement de nos données ne soit pas optimale, de même, que nous n'ayons pas pris en compte le temps succédant la rétroaction dans le calcul de la CC. La portée des résultats de ce mémoire est limitée par le contexte même de la maîtrise en éducation, nous avons fait des choix pour rendre réaliste la collecte et l'analyse des données, ces choix ont invariablement réduit l'étendue des analyses que nous souhaitions faire. Enfin, nous avons utilisé un devis de recherche corrélationnel. Nous avons donc vérifié la présence d'une relation entre des variables et non de tenté de démontrer une relation causale entre celles-ci. Bien que nos résultats soient supportés par plusieurs recherches présentées dans le cadre théorique, ils doivent être interprétés avec prudence.

5.3 Implications de l'étude

Malgré les limites énoncées concernant l'interprétation des résultats obtenus, la présente recherche permet de comprendre davantage l'impact des rétroactions sur la CC des apprenants en atelier pratique. Les implications scientifiques sont diverses, nous discuterons dans cette dernière section du dispositif de collecte utilisé, du rapport aux connaissances antérieures et de l'effet de renversement dû à l'expertise, nous concluons avec les implications sociales.

5.3.1 Implications scientifiques

Premièrement, le dispositif de collecte que nous avons mis de l'avant permet d'investiguer des processus cognitifs opérant en milieu naturel. Malgré la sensibilité des électrodes à capter du microvoltage ne

provenant pas de l'activité cérébrale et la difficulté à obtenir un signal continu (Xu et al., 2022), le traitement des données a permis d'obtenir un %DRE sensible aux variations fines de CC dans le temps. Un seul participant a mentionné être affecté par le port de l'EEG portable, cet outil de collecte semble donc être tout indiqué pour mesurer la CC d'une population adulte. De plus, contrairement à un environnement contrôlé qui permet de cibler des activations électriques précises, le fait que le participant soit en mouvement ne semble pas avoir impacté excessivement l'index de CC. Ce point est particulièrement intéressant vu le contexte d'apprentissage d'un métier, qui requiert souvent des manipulations physiques. Malgré les artefacts présents dans l'environnement ou produits par l'apprenant (Davidesco et al., 2021), nos résultats sont supportés par la TCC, il faudrait toutefois reproduire le protocole afin de valider la fiabilité de nos résultats.

Deuxièmement, l'interaction entre le niveau de rétroaction et la session vient soutenir les conclusions des recherches empiriques soulignant l'effet modérateur des connaissances antérieures sur l'efficacité des rétroactions (Buchin & Mulligan, 2022; Fyfe & Rittle-Johnson, 2016; Shirah & Sidney, 2023). L'absence d'augmentation de CC des étudiants de troisième session pour les trois variables dépendantes impactées par les RT et les RP témoignerait d'un changement psychophysologique par rapport aux étudiants de première session. La réponse cérébrale aux RP permet peut-être d'observer de manière indirecte la complexification de schémas simples en schémas complexes, attestant ainsi la pertinence des modèles cognitivistes pour comprendre l'apprentissage. L'augmentation de CC associée aux RP des étudiants de première session pour les trois variables dépendantes remet aussi en question la fiabilité d'utiliser la CC perçue par les étudiants comme mesure de l'effort cognitif (mesure subjective). L'étude de Moreno (2004) conclue que les RP améliorent davantage la performance que les RT, car les étudiants novices ressentent, selon le questionnaire standardisé complété a posteriori, une CC plus basse lorsqu'ils reçoivent des RP que des RT. Nos résultats semblent plutôt indiquer que la RP améliore la performance, car tout en respectant les limites de la MDT, elles engendrent davantage d'activations cognitives reliées à la tâche que le RT, donc qu'elles favorisent l'apprentissage.

Finalement, l'effet de renversement dû à l'expertise (ERE) est un concept clé de la TCC et de ses sous-composantes. Associé au concept d'interactivité des éléments (CI), il permet de modéliser en quoi l'apprentissage transforme le rapport aux savoirs de l'apprenant ; il permet de comprendre pourquoi certaines stratégies pédagogiques ont un effet positif ou négatif sur la performance selon le niveau d'expertise de l'apprenant. Notre étude, à notre connaissance, est la première à obtenir des résultats

psychophysiologiques permettant d'étudier cet effet à partir de données fines, en investiguant la cognition chaque seconde et non à partir de résultats de post-tests. Nos résultats supportent l'ERE, ils renforcent les résultats empiriques (Chen et al., 2017; Kirschner et al., 2006) et corroborent les bases théoriques de cet effet (Kalyuga et al., 2003; Schnotz & Kürschner, 2007). Nous avons observé l'ERE à deux niveaux, non seulement la distinction de CC entre les RT et les RP n'était visible que pour les étudiants de première session, mais encore, leur effet respectif d'abaisser la CC (RT) ou de l'augmenter (RP) ne s'est pas maintenu entre les deux cohortes, et ce, peu importe leur expérience professionnelle.

5.3.2 Implications sociales

Les implications sociales de nos résultats peuvent trouver écho dans la pratique enseignante. Sachant qu'en classe près de 90% des rétroactions visent le niveau de la tâche (Hattie & Timperley, 2007), il est pertinent de communiquer et valoriser auprès des enseignants un niveau de rétroaction visant les processus sous-jacents à l'exécution de la tâche. Les RP, ne représentant ainsi que 8% des rétroactions données en classe, seraient une stratégie pédagogique particulièrement importante pour les apprenants novices, donc débutant un programme de formation et ayant des connaissances antérieures limitées sur l'objet d'apprentissage (Hatala et al., 2014; Kirschner et al., 2006; Sweller et al., 2019). Nous avons observé que les RP augmentent davantage la CC des apprenants dans le temps que les RT et que la charge atteinte respecte les limites de la MDT, donc ce niveau de rétroaction semble tout indiqué pour maintenir l'apprenant actif dans son apprentissage, de même qu'il semble favoriser la création de schémas mentaux complexes, particulièrement ancrés dans le contexte d'apprentissages procéduraux (Kalyuga et al., 2012). À l'image d'une tâche représentant un certain défi pour l'apprenant, mais sans être hors de sa portée, Schnotz et Kürschner (2007), référant à la zone proximale de développement (ZPD) de Vygotski (2015), réitèrent l'importance de trouver un équilibre entre une CC trop faible ou élevée. La RP peuvent encourager les activations cognitives, induisant ainsi une de CC où l'apprenant actualise ses connaissances sur un sujet ou une pratique, mais évitant d'encombrer la MDT et d'entraver l'apprentissage. Nos résultats suggèrent que les RT engendrent en quelque sorte le niveau minimum d'activation en MDT pour qu'il y ait apprentissage en réaction à un niveau de rétroaction (plancher de la ZPD). Toutefois, elles encombreraient la MDT des apprenants ayant une certaine maîtrise de l'objet d'apprentissage, en activant des schémas préexistants n'étant pas en adéquation avec les besoins de l'apprenant. L'enseignant de cuisine devrait donc essayer d'inclure davantage de RP en début de formation avant de laisser l'apprenant développer ses propres référents disciplinaires et d'autoévaluer sa pratique. Les RT apparaissent naturellement et

fréquemment chez l'enseignant, elles empiètent ainsi sur un niveau de rétroaction qui semble prometteur pour le développement de compétences mobilisant des savoir-faire.

Dans une perspective plus large, nous avons relevé dans la problématique que la réussite des étudiants n'est pas que souhaitée, elle est encadrée par la Politique québécoise de la réussite éducative (2019). Les enseignantes et les enseignants de la formation professionnelle possèdent un bassin de stratégies pédagogiques issu de leur expérience professionnelle et d'enseignement, ils ont le choix d'utiliser ce qui leur semble pertinent en fonction du contexte, mais disposent de peu de données scientifiques pour orienter leur action. À notre connaissance, aucune étude ne semble avoir étudié l'impact du niveau de rétroaction verbale utilisé par l'enseignant lors d'une tâche pratique et la cognition de l'apprenant en temps réel. Sachant que les rétroactions seraient un des facteurs positifs les plus influents pour l'apprentissage (Hattie et Timperley, 2007; Wisniewski et al., 2020), notre étude a produit des résultats renforçant la pertinence d'utiliser cette mesure d'accompagnement en atelier pratique. Finalement, l'absence d'effet fixe entre l'expérience professionnelle et la CC ou d'interaction avec le niveau de rétroaction met de l'avant la pertinence d'entreprendre, poursuivre ou terminer une formation de cuisinier dans un cadre scolaire formel. Le marché du travail permettrait alors de supporter les apprentissages plutôt que de les formaliser, ce qui est couramment débattu en formation professionnelle (Guile et Unwin, 2019).

CONCLUSION

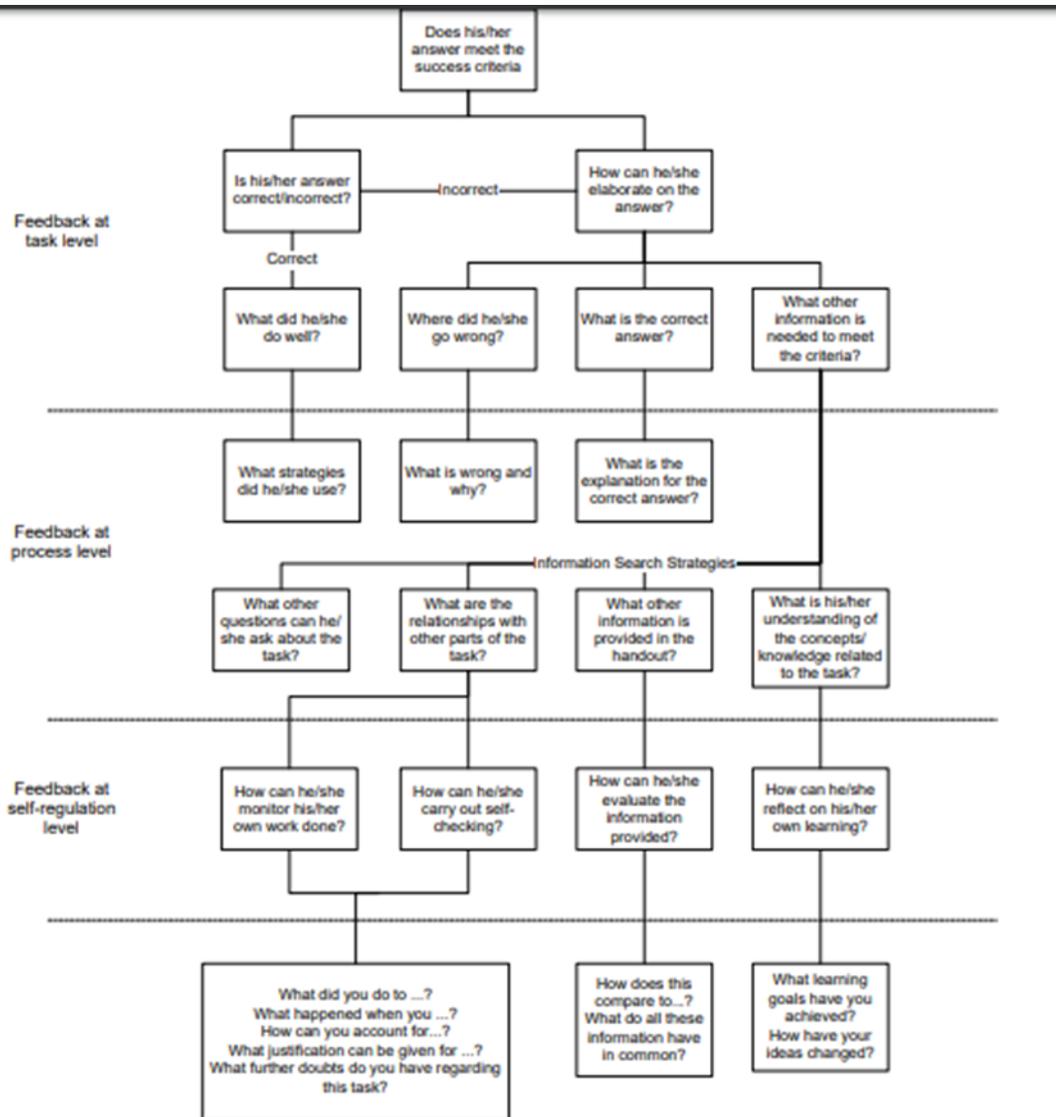
Le contexte de notre étude, la formation professionnelle et plus précisément les apprentissages en atelier pratique, n'est pas un secteur particulièrement considéré en neuroscience. Plusieurs recherches s'intéressant aux apprentissages de gestes professionnels et utilisant des méthodes issues des neurosciences ont recours à des échantillons homogènes provenant de secteurs où les résultats ont des retombées importantes, comme les secteurs de la santé et de l'aviation. Notre étude, qui vise à comprendre la relation entre le niveau de rétroaction donné à un étudiant et la CC qui en résulte, a permis d'élaborer un protocole transférable permettant d'étudier la relation entre une stratégie pédagogique précise et la cognition de l'apprenant mesurée en temps réel à partir de l'EEG. Les analyses multiniveaux que nous avons utilisées pour le traitement de nos données ont permis de répondre à notre question de recherche : les niveaux de rétroactions influencent peu la CC de l'apprenant, mais cette relation peut en partie expliquer l'impact de certains niveaux sur la performance. Bien que les données obtenues aient une forte variance et que le pourcentage de variance expliquée demeure relativement bas (de 3,9% à 13,9% selon la variable dépendante analysée), cette influence est supportée par une interaction significative. Plusieurs auteurs estiment que le pourcentage de variance expliquée doit être interprété avec prudence lors d'analyses multiniveaux, la présence d'interaction significative en lien avec le cadre théorique illustrant davantage la portée des résultats que le coefficient de détermination (Hox, 2010; Nakagawa & Schielzeth, 2013).

Nous avons ainsi pu répondre à nos objectifs qui sont de décrire et expliquer la relation entre le niveau de rétroaction utilisé et la CC découlant de ce traitement et de vérifier si cette relation est stable lors de l'acquisition d'une compétence. Les RP occasionnent une CC plus haute que les RT pour les trois variables que nous avons déterminées et cette influence n'est pas stable dans le temps. La différence de CC entre les niveaux de rétroaction sur la tâche et le processus ne se distingue que pour les étudiants de première session et ne serait pas influencé par l'expérience professionnelle des étudiants. Ainsi, la relation entre le niveau de rétroaction et la CC semble influencée par l'accès à des schémas mentaux complexes, conceptuellement et physiologiquement différents entre les novices de première session et les étudiants possédant une certaine maîtrise du geste, ceux de troisième session. Cette relation est expliquée par la TCC : les novices récupèrent de multiples schémas non agglomérés en MLT alors que les experts récupèrent des schémas agglomérés, issus de l'apprentissage, et ont donc à manipuler et à maintenir

moins d'éléments en MDT. Notre étude a décelé que les RT semblent activer peu de schémas mentaux et que les RP en activent davantage, mais sans surcharger l'apprenant.

Lorsqu'il est question d'élément à maintenir en MDT, les modèles classiques utilisent des tâches mnésiques principalement visuelles et auditives dans des environnements contrôlés (A. Baddeley, 2012; Cowan, 2008). La TCC ne distingue pas les informations selon leur nature, mais bien selon l'espace occupé en MDT. La récupération d'une procédure de travail en MLT ou le maintien d'une information pour corriger un geste occupent un espace en MDT au même titre qu'une série de nombres. Des recherches supplémentaires sur le traitement cognitif des mouvements, leur modification dans le temps par exemple, pourrait améliorer les modèles de traitement de l'information en intégrant une variable qui impacte la cognition de l'individu effectuant une tâche authentique dans un environnement dynamique.

ANNEXE A
MATRICE DE GAN (2011)



APPENDICE A

Certificat d'approbation éthique

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

Le Comité d'éthique de la recherche pour les projets étudiants impliquant des êtres humains (CERPE plurifacultaire) a examiné le projet de recherche suivant et le juge conforme aux pratiques habituelles ainsi qu'aux normes établies par la *Politique No 54 sur l'éthique de la recherche avec des êtres humains* (janvier 2016) de l'UQAM.

Titre du projet : Accompagner l'apprenant en atelier pratique : relation entre différents niveaux de rétroaction sur la charge cognitive d'étudiants en cuisine

Nom de l'étudiant : Guillaume Sparks-Beaulé

Programme d'études : Maîtrise en éducation et formation spécialisées (1873)

Direction(s) de recherche : Yves De Champlain; Julien Mercier

Modalités d'application

Toute modification au protocole de recherche en cours de même que tout événement ou renseignement pouvant affecter l'intégrité de la recherche doivent être communiqués rapidement au comité.

La suspension ou la cessation du protocole, temporaire ou définitive, doit être communiquée au comité dans les meilleurs délais.

Le présent certificat est valide pour une durée d'un an à partir de la date d'émission. Au terme de ce délai, un rapport d'avancement de projet doit être soumis au comité, en guise de rapport final si le projet est réalisé en moins d'un an, et en guise de rapport annuel pour le projet se poursuivant sur plus d'une année au plus tard un mois avant la date d'échéance (**2022-11-01**) de votre certificat. Dans ce dernier cas, le rapport annuel permettra au comité de se prononcer sur le renouvellement du certificat d'approbation éthique.

Caroline Vrignaud

Pour le président,

Raoul Graf, M.A., Ph.D.

Président CERPE plurifacultaire

Professeur titulaire, département de marketing



APPENDICE B

Formulaire de consentement



FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

Titre du projet de recherche

Numéro de projet : 2022-4117

Accompagner l'apprenant en atelier pratique : relation entre différents niveaux de rétroaction sur la charge cognitive d'étudiants en cuisine.

Étudiant-chercheur

Guillaume Sparks-Beaulé
Département d'éducation et formation spécialisées
Téléphone : (438) 391-1245
Courriel : sparks-beaule.guillaume@courrier.uqam.ca

Direction de recherche

Yves De Champlain, département d'éducation et formation spécialisées
Téléphone : (514) 987-3000 poste 3417
Courriel : de_champlain.yves@uqam.ca

Julien Mercier, département d'éducation et formation spécialisées
Téléphone : (514) 987-3000 poste 1091
Courriel : mercier.julien@uqam.ca

Préambule

Nous vous sollicitons à participer à un projet de recherche qui implique d'effectuer une tâche d'une vingtaine de minutes en atelier de cuisine, tout en étant filmé et monitoré avec un électroencéphalogramme. Avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Ce formulaire de consentement vous explique le but de cette étude, les procédures, les avantages, les risques et inconvénients, de même que les personnes avec qui communiquer au besoin.

Le présent formulaire de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles.

Description du projet et de ses objectifs

Ce projet de recherche vise à mieux comprendre l'effet des rétroactions sur la cognition des étudiants en cuisine. Nous supposons que les rétroactions utilisées par les enseignants influencent différemment la charge cognitive des apprenants et que votre niveau d'expertise en cuisine modère cette influence. Les études en éducation établissant spécifiquement des liens entre les rétroactions et la charge cognitive de l'apprenant ont évalué celle-ci à partir de questionnaires ou à l'aide de tests, ce qui ne permet pas d'observer à un moment précis la charge cognitive de l'apprenant. L'électroencéphalogramme permet de mesurer la charge cognitive instantanée, donc l'impact direct de la rétroaction sur votre cognition.

Afin de comprendre davantage la relation entre les rétroactions et la charge cognitive d'apprenants en situation pratique et le développement de l'expertise de l'apprenant, cette recherche a pour objectifs les suivants : décrire et expliquer la relation entre la rétroaction verbale utilisée par l'enseignant en atelier pratique et la charge cognitive de l'étudiant et de comparer les mesures de charge cognitive associées aux rétroactions à différents moments de l'acquisition d'une compétence.

Pour ce faire, nous sollicitons la participation de 15 étudiants (FCG, CCI, GER) débutant leur programme et de 15 le terminant.

Nature et durée de votre participation

Cette recherche se déroule en atelier de cuisine, avec votre enseignant titulaire et vos collègues de classe. Durant un atelier pratique authentique, donc dans un vrai cours, vous effectuerez individuellement une activité d'apprentissage d'une vingtaine de minutes reliée à votre programme d'études. La tâche sera une activité demandée par votre enseignant de cuisine cette journée-là, vous réaliserez la même tâche que vos collègues, en même temps et dans les mêmes délais, ce n'est donc pas une tâche programmée par le chercheur. Puisque la collecte de donnée sera faite sur plusieurs jours, tous les participants ne réaliseront pas la même tâche. Cependant, les participants exécuteront tous une tâche en lien avec la compétence Fruits et Légumes, car c'est une compétence réinvestie tout au long de votre formation et que nous avons besoin d'étudiants commençant et terminant le programme.

La journée de votre participation, vous arriverez 45 minutes avant le début de votre cours de cuisine. Un court questionnaire vous sera remis à même votre fiche d'identification et nous procéderons à l'installation de l'électroencéphalogramme portatif. L'installation sera faite par l'étudiant-chercheur ou un assistant de recherche. Au début du cours, lorsque votre enseignant aura terminé le plan de la journée, vous effectuerez normalement ce qui vous est demandé. L'étudiant-chercheur, qui enseigne aussi la cuisine à l'Institut de tourisme et d'hôtellerie du Québec, vous fera alors des rétroactions durant une vingtaine de minutes sur les manipulations que vous faites. Durant cette période, vous serez filmé afin que nous puissions par après identifier les rétroactions et les électrodes capterons l'activité électrique de certaines régions de votre cerveau. À la suite de la tâche, nous cesserons la captation vidéo, retirerons l'électroencéphalogramme et vous pourrez poursuivre votre cours normalement. L'étudiant-chercheur n'est pas votre enseignant et votre participation n'influence en rien vos évaluations futures ou votre parcours scolaire.

Voici quelques informations particulières à l'appareillage d'électroencéphalographie et à la collecte du signal électrique :

- o Les électrodes n'émettent aucun rayonnement. Elles ne font que capter le signal électrique émis naturellement par le cerveau du participant ;
- o La sensation du port du bonnet est similaire à celle que l'on a avec un casque de bain. Le bonnet utilisé aura été complètement désinfecté avant son utilisation. Il est nécessaire que le chercheur touche votre tête au moment où doit être placé le bonnet. Votre pouvez refuser que le bonnet lui soit placé sur votre tête, dans ce cas, vous ne pourrez pas participer à l'expérimentation ;
- o Une petite quantité de gel doit être appliquée sous chaque électrode afin d'assurer la qualité du signal. Ce gel est à base d'eau et ne comporte aucun risque pour le cuir chevelu ;
- o Seul le gel est en contact direct avec la peau. Les électrodes ne touchent pas la tête directement, ne provoquent aucune douleur, ne nécessitent aucune piqure et ne blessent pas la peau en aucune manière.
- o Tout au long de l'installation du bonnet et du gel, l'étudiant-chercheur et l'assistant de recherche s'assurent que le participant est confortable en lui demandant fréquemment comment il se sent ;
- o À la fin de l'expérimentation, les cheveux du participant auront certainement quelques résidus de gel, qui disparaissent après un rinçage à l'eau tiède (possibilité de le faire sur place).

Avantages liés à la participation

Votre participation à ce projet nous permettra de mieux comprendre l'impact des rétroactions sur la cognition des étudiants en cuisine. En plus de contribuer à l'avancement de la science, vous aurez accès, durant l'expérimentation, à des rétroactions ciblées sur votre pratique, sur la qualité de votre production et sur votre façon d'organiser votre travail.

Risques liés à la participation

Il n'y a pas de risque d'inconfort significatif associé à votre participation à cette recherche. Les activités sont celles que vous rencontrez dans une journée de classe ordinaire. Cette étude ne requiert aucune utilisation d'équipement dangereux, à l'exception de l'outillage habituellement utilisé en cuisine. Néanmoins, soyez assuré que l'équipe de recherche demeurera attentive à toute manifestation d'inconfort de votre part. Sachez aussi qu'il est de la responsabilité de l'étudiant-chercheur de suspendre ou de mettre fin votre participation s'il estime que votre bien-être peut être compromis.

Confidentialité

Il est entendu que tous les renseignements recueillis sont confidentiels. Seuls les membres de l'équipe de recherche, c'est-à-dire

l'étudiant-chercheur, les directions de recherche et les assistants de recherche, s'il y a lieu, auront accès à ces renseignements et ils ne seront pas dévoilés lors de la diffusion des résultats. L'ensemble du matériel de recherche ainsi que le formulaire d'information et de consentement seront conservés séparément en lieu sûr au bureau du chercheur responsable pour la durée totale du projet. Afin de protéger l'identité et la confidentialité des données recueillies, vous serez toujours identifié(e) par un code. Ce code associé à votre nom ne sera connu que du chercheur responsable du projet.

À l'exception des courriels personnels permettant de vous communiquer les résultats (facultatif), les informations personnelles seront conservées pendant un an, sous clé dans le bureau du chercheur responsable, après quoi elles seront détruites mécaniquement. Les enregistrements vidéo et les données psychophysiologiques associées recueillies par l'électroencéphalogramme seront conservées sur un serveur avec mot de passe pour une durée indéterminée, de futures analyses pouvant être reconduites. Ainsi, vos données anonymisées pourraient être réutilisées dans des recherches subséquentes, mais avec l'impossibilité de vous identifier. L'ensemble des documents seront toutefois détruits cinq ans après la dernière communication scientifique.

Participation volontaire et retrait

Votre participation est entièrement libre et volontaire. Vous pouvez refuser d'y participer ou vous retirer en tout temps sans devoir justifier votre décision. Si vous décidez de vous retirer de l'étude, vous n'avez qu'à aviser Guillaume Sparks-Beaulé verbalement ; toutes les données vous concernant seront détruites.

Indemnité compensatoire

Votre participation à ce projet de recherche vous donne droit à une compensation financière de 30 \$. Le montant vous sera remis le jour de votre participation, lors de la signature du formulaire de consentement.

Des questions sur le projet ?

Pour toute question additionnelle sur le projet et sur votre participation vous pouvez communiquer avec les responsables du projet :

Étudiant-chercheur :

Guillaume Sparks-Beaulé
Département d'éducation et formation spécialisées
Téléphone : (438) 391-1245
Courriel : sparks-beaule.guillaume@courrier.uqam.ca

Direction de recherche

Yves De Champlain, département d'éducation et formation spécialisées
Téléphone : (514) 987-3000 poste 3417
Courriel : de_champlain.yves@uqam.ca

Julien Mercier, département d'éducation et formation spécialisées

Téléphone : (514) 987-3000 poste 1091
Courriel : mercier.julien@uqam.ca

Des questions sur vos droits ? Le Comité d'éthique de la recherche pour les projets étudiants impliquant des êtres humains (CERPE) a approuvé le projet de recherche (2022-4117) auquel vous allez participer. Pour des informations concernant les responsabilités de l'équipe de recherche au plan de l'éthique de la recherche avec des êtres humains ou pour formuler une plainte, vous pouvez contacter la coordination du CERPE au (514) 987-3000, poste 6188, ou par courriel à : cerpe-pluri@uqam.ca.

Remerciements

Votre collaboration est essentielle à la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à vous en remercier.

Consentement

Je déclare avoir lu et compris le présent projet, la nature et l'ampleur de ma participation, ainsi que les risques et les inconvénients auxquels je m'expose tels que présentés dans le présent formulaire. J'ai eu l'occasion de poser toutes les questions concernant les différents aspects de l'étude et de recevoir des réponses à ma satisfaction.

Je, soussigné(e), accepte volontairement de participer à cette étude. Je peux me retirer en tout temps sans préjudice d'aucune sorte. Je certifie qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre ma décision.

Une copie signée de ce formulaire d'information et de consentement doit m'être remise.

Prénom Nom

Signature

Date

Diffusion des résultats (facultatif)

Je souhaite recevoir les résultats de cette recherche. Votre courriel personnel permettra à l'équipe de recherche de vous communiquer les résultats dans un format clair et précis, même lorsque vous aurez quitté votre établissement d'enseignement.

Courriel

Engagement du chercheur

Je, soussigné(e) certifie

- (a) avoir expliqué au signataire les termes du présent formulaire; (b) avoir répondu aux questions qu'il m'a posées à cet égard;
- (c) lui avoir clairement indiqué qu'il reste, à tout moment, libre de mettre un terme à sa participation au projet de recherche décrit ci-dessus;
- (d) que je lui remettrai une copie signée et datée du présent formulaire.

Prénom Nom

Signature

Date

RÉFÉRENCES

- Adolphs, R. (2003). Cognitive neuroscience of human social behaviour. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(3), 165-178. <https://doi.org/10.1038/nrn1056>
- Aizawa, K. (2017). Cognition and behavior. *Synthese*, 194(11), 4269-4288. <https://doi.org/10.1007/s11229-014-0645-5>
- Alday, P. M. (2019). How much baseline correction do we need in ERP research? Extended GLM model can replace baseline correction while lifting its limits. *Psychophysiology*, 56(12), e13451. <https://doi.org/10.1111/psyp.13451>
- Anderson, J. R. (2002). Spanning seven orders of magnitude : A challenge for cognitive modeling. *Cognitive Science*, 26(1), 85-112. https://doi.org/10.1207/s15516709cog2601_3
- Andersson, I.-M., Gunnarsson, K., Rosèn, G., & Moström Åberg, M. (2014). Knowledge and Experiences of Risks among Pupils in Vocational Education. *Safety and Health at Work*, 5(3), 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.06.002>
- Andreassi, J. L. (2007). *Psychophysiology : Human behavior and physiological response* (5. ed). Psychology Press.
- Ansari, D., De Smedt, B., & Grabner, R. H. (2012). Neuroeducation – A Critical Overview of An Emerging Field. *Neuroethics*, 5(2), 105-117. <https://doi.org/10.1007/s12152-011-9119-3>
- Antonenko, P. D., van Gog, T., & Paas, F. (2014). Implications of Neuroimaging for Educational Research. In J. M. Spector, M. D. Merrill, J. Elen, & M. J. Bishop (Éds.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (p. 51-63). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_5
- Archer, J. C. (2010). State of the science in health professional education : Effective feedback: Effective feedback in health professional education. *Medical Education*, 44(1), 101-108. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2009.03546.x>
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human Memory : A Proposed System and its Control Processes. In K. W. Spence & J. T. Spence (Éds.), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 2, p. 89-195). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60422-3](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60422-3)
- Baddeley, A. (2012). Working Memory : Theories, Models, and Controversies. *Annual Review of Psychology*, 63(1), 1-29. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422>
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. In G. H. Bower (Éd.), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 8, p. 47-89). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Bangert-Drowns, R. L., Kulik, C.-L. C., Kulik, J. A., & Morgan, M. (1991). The Instructional Effect of Feedback in Test-Like Events. *Review of Educational Research*, 61(2), 213-238. <https://doi.org/10.3102/00346543061002213>

- Bara, F., & Tricot, A. (2017). Le rôle du corps dans les apprentissages symboliques : Apports des théories de la cognition incarnée et de la charge cognitive. *Recherches sur la philosophie et le langage*, 33, 36.
- Bear, M. F., Paradiso, M. A., & Connors, B. W. (2005). *Neurosciences : À la découverte du cerveau*. Pradel.
- Bégin, C. (2008). Les stratégies d'apprentissage : Un cadre de référence simplifié. *Revue des sciences de l'éducation*, 34(1), 47. <https://doi.org/10.7202/018989ar>
- Blais, M., & Martineau, S. (2006). L'analyse inductive générale : Description d'une démarche visant à donner un sens à des données brutes. *RECHERCHES QUALITATIVES*, 26(2), 1-18.
- Boud, D., & Molloy, E. (2013). Rethinking models of feedback for learning : The challenge of design. *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 38(6), 698-712. <https://doi.org/10.1080/02602938.2012.691462>
- Bowers, J. S. (2016a). Psychology, not educational neuroscience, is the way forward for improving educational outcomes for all children : Reply to Gabrieli (2016) and Howard-Jones et al. (2016). *Psychological Review*, 123(5), 628-635. <https://doi.org/10.1037/rev0000043>
- Bowers, J. S. (2016b). The practical and principled problems with educational neuroscience. *Psychological Review*, 123(5), 600-612. <https://doi.org/10.1037/rev0000025>
- Bressoux, P. (2010). *Modélisation statistique appliquée aux sciences sociales* (2e éd). De Boeck.
- Brooks, C., Carroll, A., University of Queensland, Gillies, R., University of Queensland, Hattie, J., & University of Melbourne. (2019). A Matrix of Feedback. *Australian Journal of Teacher Education*, 44(4), 14-32. <https://doi.org/10.14221/ajte.2018v44n4.2>
- Brown, G. T. L., Harris, L. R., & Harnett, J. (2012). Teacher beliefs about feedback within an assessment for learning environment : Endorsement of improved learning over student well-being. *Teaching and Teacher Education*, 28(7), 968-978. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2012.05.003>
- Bruer, J. T. (1997). Education and the Brain : A Bridge Too Far. *Educational Researcher*, 26(8), 4-16. <https://doi.org/10.3102/0013189X026008004>
- Buchin, Z. L., & Mulligan, N. W. (2022). Retrieval-based learning and prior knowledge. *Journal of Educational Psychology*. <https://doi.org/10.1037/edu0000773>
- Buckley, P. (2012). Can the effectiveness of different forms of feedback be measured? Retention and student preference for written and verbal feedback in level 4 bioscience students. *Journal of Biological Education*, 46(4), 242-246. <https://doi.org/10.1080/00219266.2012.702676>
- Campbell, S., & Pagé, P. (2012). La neuroscience éducationnelle : Enrichir la recherche en éducation par l'ajout de méthodes psychophysiologiques pour mieux comprendre l'apprentissage. *Neuroeducation*, 1(1), 115-144. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.115>

- Chang, M., Büchel, D., Reinecke, K., Lehmann, T., & Baumeister, J. (2022). Ecological validity in exercise neuroscience research : A systematic investigation. *European Journal of Neuroscience*, *55*(2), 487-509. <https://doi.org/10.1111/ejn.15595>
- Chen, O., Castro-Alonso, J. C., Paas, F., & Sweller, J. (2018). Extending Cognitive Load Theory to Incorporate Working Memory Resource Depletion : Evidence from the Spacing Effect. *Educational Psychology Review*, *30*(2), 483-501. <https://doi.org/10.1007/s10648-017-9426-2>
- Chen, O., Kalyuga, S., & Sweller, J. (2017). The Expertise Reversal Effect is a Variant of the More General Element Interactivity Effect. *Educational Psychology Review*, *29*(2), 393-405. <https://doi.org/10.1007/s10648-016-9359-1>
- Clariana, R. B., Wagner, D., & Roher Murphy, L. C. (2000). Applying a connectionist description of feedback timing. *Educational Technology Research and Development*, *48*(3), 5-22. <https://doi.org/10.1007/BF02319855>
- Clark, A. (2010). Much Ado About Cognition. *Mind*, *119*(476), 1047-1066. <https://doi.org/10.1093/mind/fzr002>
- Cowan, N. (2008). Chapter 20 What are the differences between long-term, short-term, and working memory? In *Progress in Brain Research* (Vol. 169, p. 323-338). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(07\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(07)00020-9)
- Davidesco, I., Matuk, C., Bevilacqua, D., Poeppel, D., & Dikker, S. (2021). Neuroscience Research in the Classroom : Portable Brain Technologies in Education Research. *Educational Researcher*, *50*(9), 649-656. <https://doi.org/10.3102/0013189X211031563>
- De Smedt, B. (2014). Advances in the Use of Neuroscience Methods in Research on Learning and Instruction. *Frontline Learning Research*, *6*, 7-14.
- Dejnozka, E. L., Kapel, D. E., Gifford, C. S., & Kapel, M. B. (1991). *American educators' encyclopedia* (Rev. ed). Greenwood Press.
- de Jong, T. (2010). Cognitive load theory, educational research, and instructional design : Some food for thought. *Instructional Science*, *38*(2), 105-134. <https://doi.org/10.1007/s11251-009-9110-0>
- Demanuele, C., Broyd, S. J., Sonuga-Barke, E. J. S., & James, C. (2013). Neuronal oscillations in the EEG under varying cognitive load : A comparative study between slow waves and faster oscillations. *Clinical Neurophysiology*, *124*(2), 247-262. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2012.07.021>
- Dempsey, J. V., Driscoll, M. P., & Swindell, L. K. (1993). Text-based feedback. In *Interactive instruction and feedback* (p. 21-54). Educational Technology Publications.
- Di Paolo, E., & De Jaegher, H. (2012). The interactive brain hypothesis. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00163>
- Dreyfus, H. L. (2002). Intelligence without representation – Merleau-Ponty's critique of mental representation The relevance of phenomenology to scientific explanation. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, *1*(4), 367-383. <https://doi.org/10.1023/A:1021351606209>

- Eriksson, J., Vogel, E. K., Lansner, A., Bergström, F., & Nyberg, L. (2015). Neurocognitive Architecture of Working Memory. *Neuron*, *88*(1), 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.020>
- Feldon, D. F. (2007). Cognitive Load and Classroom Teaching : The Double-Edged Sword of Automaticity. *Educational Psychologist*, *42*(3), 123-137. <https://doi.org/10.1080/00461520701416173>
- Filliettaz, L., de Saint-Georges, I., & Duc, B. (2010). Skiing, Cheese Fondue and Swiss Watches : Analogical Discourse in Vocational Training Interactions. *Vocations and Learning*, *3*(2), 117-140. <https://doi.org/10.1007/s12186-010-9035-4>
- Fortin, M.-F., & Gagnon, J. (2016). *Fondements et étapes du processus de recherche : Méthodes quantitatives et qualitatives*. Chenelière éducation.
- Frey, B. B. (2022). *The SAGE Encyclopedia of Research Design*. SAGE Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781071812082>
- Friedman, N., Fekete, T., Gal, K., & Shriki, O. (2019). EEG-Based Prediction of Cognitive Load in Intelligence Tests. *Frontiers in Human Neuroscience*, *13*, 191. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00191>
- Fyfe, E. R., DeCaro, M. S., & Rittle-Johnson, B. (2015). When feedback is cognitively-demanding : The importance of working memory capacity. *Instructional Science*, *43*(1), 73-91. <https://doi.org/10.1007/s11251-014-9323-8>
- Fyfe, E. R., & Rittle-Johnson, B. (2016). Feedback both helps and hinders learning : The causal role of prior knowledge. *Journal of Educational Psychology*, *108*(1), 82-97. <https://doi.org/10.1037/edu0000053>
- Gabrieli, J. D. E. (2016). The promise of educational neuroscience : Comment on Bowers (2016). *Psychological Review*, *123*(5), 613-619. <https://doi.org/10.1037/rev0000034>
- Gan, M. G. J. S. (2011). *The effects of prompts and explicit coaching on peer feedback quality*. Doctoral thesis. The University of Auckland.
- Gaudreau, L. (2011). *Guide pratique pour créer et évaluer une recherche scientifique en éducation*. Guérin.
- Geake, J., & Cooper, P. (2003). Cognitive Neuroscience : Implications for education? *Westminster Studies in Education*, *26*(1), 7-20. <https://doi.org/10.1080/0140672030260102>
- Gerjets, P., Scheiter, K., & Cierniak, G. (2009). The Scientific Value of Cognitive Load Theory : A Research Agenda Based on the Structuralist View of Theories. *Educational Psychology Review*, *21*(1), 43-54. <https://doi.org/10.1007/s10648-008-9096-1>
- Gevins, A., & Smith, M. E. (2003). Neurophysiological measures of cognitive workload during human-computer interaction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *4*(1-2), 113-131. <https://doi.org/10.1080/14639220210159717>

- Ginns, P. (2005). Meta-analysis of the modality effect. *Learning and Instruction*, 15(4), 313-331. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2005.07.001>
- Grimes, D., Tan, D. S., Hudson, S. E., Shenoy, P., & Rao, R. P. N. (2008). Feasibility and pragmatics of classifying working memory load with an electroencephalograph. *Proceeding of the Twenty-Sixth Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '08*, 835. <https://doi.org/10.1145/1357054.1357187>
- Guile, D., & Unwin, L. (Éds.). (2019). *The Wiley Handbook of Vocational Education and Training* (1^{re} éd.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119098713>
- Haccoun, R. R., & Cousineau, D. (2014). *Statistiques : Concepts et applications*. Presses de l'Université de Montréal. <http://www.library.yorku.ca/e/resolver/id/2535469>
- Harris, L. R., Brown, G. T. L., & Harnett, J. A. (2015). Analysis of New Zealand primary and secondary student peer- and self-assessment comments : Applying Hattie and Timperley's feedback model. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice*, 22(2), 265-281. <https://doi.org/10.1080/0969594X.2014.976541>
- Hatala, R., Cook, D. A., Zendejas, B., Hamstra, S. J., & Brydges, R. (2014). Feedback for simulation-based procedural skills training : A meta-analysis and critical narrative synthesis. *Advances in Health Sciences Education*, 19(2), 251-272. <https://doi.org/10.1007/s10459-013-9462-8>
- Hattie, J. (2012). *Visible learning for teachers : Maximizing impact on learning*. Routledge.
- Hattie, J., & Clarke, S. (2019). *Visible learning : Feedback*. Routledge, Taylor & Francis Group.
- Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The Power of Feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81-112. <https://doi.org/10.3102/003465430298487>
- Heisz, J. J., & McIntosh, A. R. (2013). Applications of EEG Neuroimaging Data : Event-related Potentials, Spectral Power, and Multiscale Entropy. *Journal of Visualized Experiments*, 76. <https://doi.org/10.3791/50131>
- Heusdens, W. T., Bakker, A., Baartman, L. K. J., & De Bruijn, E. (2016). Contextualising Vocational Knowledge : A Theoretical Framework and Illustrations From Culinary Education. *Vocations and Learning*, 9(2), 151-165. <https://doi.org/10.1007/s12186-015-9145-0>
- Holm, A., Lukander, K., Korpela, J., Sallinen, M., & Müller, K. M. I. (2009). Estimating Brain Load from the EEG. *The Scientific World JOURNAL*, 9, 639-651. <https://doi.org/10.1100/tsw.2009.83>
- Horr, N. K., Han, K., Mousavi, B., & Tang, R. (2022). Neural Signature of Buying Decisions in Real-World Online Shopping Scenarios – An Exploratory Electroencephalography Study Series. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 797064. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.797064>
- Howard-Jones, P. A., Varma, S., Ansari, D., Butterworth, B., De Smedt, B., Goswami, U., Laurillard, D., & Thomas, M. S. C. (2016). The principles and practices of educational neuroscience : Comment on Bowers (2016). *Psychological Review*, 123(5), 620-627. <https://doi.org/10.1037/rev0000036>

- Hox, J. J. (2010). *Multilevel analysis : Techniques and applications* (2. ed). Routledge, Taylor & Francis.
- Kalyuga, S. (2007). Expertise Reversal Effect and Its Implications for Learner-Tailored Instruction. *Educational Psychology Review*, 19(4), 509-539. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9054-3>
- Kalyuga, S. (2011). Cognitive Load Theory : How Many Types of Load Does It Really Need? *Educational Psychology Review*, 23(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9150-7>
- Kalyuga, S. (2015). *Instructional guidance : A cognitive load perspective*. Information Age Publishing, Inc.
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P., & Sweller, J. (2003). The Expertise Reversal Effect. *Educational Psychologist*, 38(1), 23-31. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_4
- Kalyuga, S., Rikers, R., & Paas, F. (2012). Educational Implications of Expertise Reversal Effects in Learning and Performance of Complex Cognitive and Sensorimotor Skills. *Educational Psychology Review*, 24(2), 313-337. <https://doi.org/10.1007/s10648-012-9195-x>
- Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work : An Analysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experiential, and Inquiry-Based Teaching. *Educational Psychologist*, 41(2), 75-86. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_1
- Kluger, A. N., & DeNisi, A. (1996). The effects of feedback interventions on performance : A historical review, a meta-analysis, and a preliminary feedback intervention theory. *Psychological Bulletin*, 119(2), 254-284. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.119.2.254>
- Ladouce, S., Donaldson, D. I., Dudchenko, P. A., & Ietswaart, M. (2017). Understanding Minds in Real-World Environments : Toward a Mobile Cognition Approach. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00694>
- Lai, M.-L., Tsai, M.-J., Yang, F.-Y., Hsu, C.-Y., Liu, T.-C., Lee, S. W.-Y., Lee, M.-H., Chiou, G.-L., Liang, J.-C., & Tsai, C.-C. (2013). A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educational Research Review*, 10, 90-115. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.10.001>
- Lazega, E., & Snijders, T. A. B. (Éds.). (2016). *Multilevel network analysis for the social sciences : Theory, methods and applications*. Springer.
- Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation*. (3ème). Guérin éditeur.
- Lei, X., & Liao, K. (2017). Understanding the Influences of EEG Reference : A Large-Scale Brain Network Perspective. *Frontiers in Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00205>
- Lenoir, Y. (2014). *Les médiations au cœur des pratiques d'enseignement-apprentissage : Une approche dialectique : des fondements à leur actualisation en classe : éléments pour une théorie de l'intervention éducative* (GroupÉditions).
- Leppink, J., Paas, F., Van der Vleuten, C. P. M., Van Gog, T., & Van Merriënboer, J. J. G. (2013). Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behavior Research Methods*, 45(4), 1058-1072. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0334-1>

- Lin, C.-T., Chen, Y.-C., Huang, T.-Y., Chiu, T.-T., Ko, L.-W., Liang, S.-F., Hsieh, H.-Y., Hsu, S.-H., & Duann, J.-R. (2008). Development of wireless brain computer interface with embedded multitask scheduling and its application on real-time driver's drowsiness detection and warning. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, *55*(5), 1582-1591. <https://doi.org/10.1109/TBME.2008.918566>
- Loomes, M., Tran, D. M. D., Chowdhury, N. S., Birney, D. P., Harris, J. A., & Livesey, E. J. (2023). Is cortical inhibition in primary motor cortex related to executive control? *Cortex*, *160*, 100-114. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.12.013>
- Martínez Vásquez, D. A., Posada-Quintero, H. F., & Rivera Pinzón, D. M. (2023). Mutual Information between EDA and EEG in Multiple Cognitive Tasks and Sleep Deprivation Conditions. *Behavioral Sciences*, *13*(9), 707. <https://doi.org/10.3390/bs13090707>
- Mason, B., & Bruning, R. (2001). *Providing feedback in computer-based instruction : What the research tells us*. *15*, 2-21.
- Matlin, M. W. (2001). *La cognition : Une introduction à la psychologie cognitive*. De Boeck.
- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability : The kappa statistic. *Biochemia Medica*, *22*(3), 276-282.
- MEES. (2016). *Les différentes voies d'accès menant à la profession enseignante—Formation professionnelle*. Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement Supérieur. http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/reseau/formation_titularisation/Autorisations_denseigner/VoiesAccesProfEns_FP_fr.pdf
- MELS. (2010a). *Cadre de référence sur la planification des activités d'apprentissage et d'évaluation*. https://www.inforoutefpt.org/ministere_docs/AdminInfo/CadreRef/CadreReference.pdf
- MELS. (2010b). *La formation professionnelle et technique au Québec*. (56p.). Ministère de l'Éducation du Loisir et du Sport.
- MELS, Beaussier, D., Vincent, A., & Léveillée, C. (2008). *Cuisine : Programme d'études professionnelles, 5311*. Ministère de l'éducation, du loisir et du sport, Formation professionnelle et technique et formation continue, Direction générale de la formation professionnelle et technique.
- MELS, Direction générale des programmes et du développement, Formation professionnelle et technique et formation continue, Pageau, F., Adan, A., & Vincent, A. (2005). *Gestion d'un établissement de restauration : Programme d'études techniques, 430.B0*. La Direction. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/1561823>
- Mercier, J., & Bédard, M. (2016). An educational neuroscience perspective on tutoring : To what extent can electrophysiological measures improve the contingency of tutor scaffolding and feedback ? *Themes in Science & Technology Education*, *9*(2), 109-125.
- Mercier, J., Léger, P.-M., Girard, C., & Dion, J.-S. (2012). Bridging the gap between cognitive neuroscience and education : Psychophysiological and behavioral data collection in authentic contexts. *Neuroeducation*, *1*(1), 5-28. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.5>

- Merleau-Ponty, M. (2009). *Phénoménologie de la perception*. Gallimard.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Monchatre, S., & CIRST. (2008). *L'approche par compétence, technologie de rationalisation pédagogique : Le cas de la formation au Québec*. CIRST.
- Moreno, R. (2004). Decreasing Cognitive Load for Novice Students : Effects of Explanatory versus Corrective Feedback in Discovery-Based Multimedia. *Instructional Science*, 32(1/2), 99-113. <https://doi.org/10.1023/B:TRUC.0000021811.66966.1d>
- Moreno, R., & Mayer, R. E. (2005). Role of Guidance, Reflection, and Interactivity in an Agent-Based Multimedia Game. *Journal of Educational Psychology*, 97(1), 117-128. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.97.1.117>
- Mory, E. H. (2004). Feedback research revisited. In D. Jonassen (Ed.), *Handbook of research on educational communications and technology* (Mahwah, Vol. 2, p. 745-783). Erlbaum.
- Nakagawa, S., & Schielzeth, H. (2013). A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 133-142. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00261.x>
- Narciss, S., & Huth, K. (2002). How to design informative tutoring feedback for multimedia learning. H. Niegemann, R. Brünken, & D. Leutner (Eds.), *Instructional Design for Multimedia Learning*. Münster: Waxmann, 16.
- Newell, A. (1994). *Unified theories of cognition* (1. Harvard Univ. Press paperback ed). Harvard Univ. Press.
- Nurislamova, Y. M., Novikov, N. A., Zhzhikashvili, N. A., & Chernyshev, B. V. (2019). Enhanced Theta-Band Coherence Between Midfrontal and Posterior Parietal Areas Reflects Post-feedback Adjustments in the State of Outcome Uncertainty. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 13, 14. <https://doi.org/10.3389/fnint.2019.00014>
- Olschewski, S., Rieskamp, J., & Scheibehenne, B. (2018). Taxing cognitive capacities reduces choice consistency rather than preference : A model-based test. *Journal of Experimental Psychology: General*, 147(4), 462-484. <https://doi.org/10.1037/xge0000403>
- Ortiz, O., Kuruganti, U., Chester, V., Wilson, A., & Blustein, D. H. (2023). Changes in EEG alpha-band power during prehension indicates neural motor drive inhibition. *Journal of Neurophysiology*. <https://doi.org/10.1152/jn.00506.2022>
- Örün, Ö., & Akbulut, Y. (2019). Effect of multitasking, physical environment and electroencephalography use on cognitive load and retention. *Computers in Human Behavior*, 92, 216-229. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.11.027>

- Ozcinar, Z. (2009). The topic of instructional design in research journals : A citation analysis for the years 1980-2008. *Australasian Journal of Educational Technology*, 25(4).
<https://doi.org/10.14742/ajet.1129>
- Paas, F., & Sweller, J. (2012). An Evolutionary Upgrade of Cognitive Load Theory : Using the Human Motor System and Collaboration to Support the Learning of Complex Cognitive Tasks. *Educational Psychology Review*, 24(1), 27-45. <https://doi.org/10.1007/s10648-011-9179-2>
- Paas, F., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., & Van Gerven, P. W. M. (2003). Cognitive Load Measurement as a Means to Advance Cognitive Load Theory. *Educational Psychologist*, 38(1), 63-71.
https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_8
- Paas, F., & Van Merriënboer, J. (1994). Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills : A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 86(1), 122-133. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.86.1.122>
- Penney, J. (2023). Cautions when normalizing the dependent variable in a regression as a z-score. *Economic Inquiry*, 61(2), 402-412. <https://doi.org/10.1111/ecin.13127>
- Rice, M. E., & Harris, G. T. (2005). Comparing effect sizes in follow-up studies : ROC Area, Cohen's d, and r. *Law and Human Behavior*, 29(5), 615-620. <https://doi.org/10.1007/s10979-005-6832-7>
- Robichaud, A., Schwimmer, M., & Gauthier-Lacasse, M. (2018). Étudier l'accueil des neurosciences en éducation : Une illustration épistémologique à partir de la positivisme strict. *Éducation et socialisation*, 49. <https://doi.org/10.4000/edso.4037>
- Rudland, J., Wilkinson, T., Wearn, A., Nicol, P., Tunny, T., Owen, C., & O'Keefe, M. (2013). A student-centred feedback model for educators. *The Clinical Teacher*, 10(2), 99-102.
<https://doi.org/10.1111/j.1743-498X.2012.00634.x>
- Salomon, G. (1984). Television is « easy » and print is « tough » : The differential investment of mental effort in learning as a function of perceptions and attributions. *Journal of Educational Psychology*, 76(4), 647-658. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.76.4.647>
- Scharinger, C., Soutschek, A., Schubert, T., & Gerjets, P. (2017). Comparison of the Working Memory Load in N-Back and Working Memory Span Tasks by Means of EEG Frequency Band Power and P300 Amplitude. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00006>
- Schmidt, R. A. (1991). Frequent Augmented Feedback Can Degrade Learning : Evidence and Interpretations. In J. Requin & G. E. Stelmach (Éds.), *Tutorials in Motor Neuroscience* (p. 59-75). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3626-6_6
- Schnotz, W., & Kürschner, C. (2007). A Reconsideration of Cognitive Load Theory. *Educational Psychology Review*, 19(4), 469-508. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9053-4>
- Sherman, S. M. (2006). The neural substrates of cognition. *Trends in Neurosciences*, 29(6), 295-297.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.05.005>

- Shirah, J. F., & Sidney, P. G. (2023). Computer-based feedback matters when relevant prior knowledge is not activated. *Learning and Instruction, 87*, 101796. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2023.101796>
- Shute, V. J. (2008). Focus on Formative Feedback. *Review of Educational Research, 78*(1), 153-189. <https://doi.org/10.3102/0034654307313795>
- Snijders, T. A. B. (2005). Power and Sample Size in Multilevel Linear Models. In B. S. Everitt & D. C. Howell (Éds.), *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science* (1^{re} éd.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470013192.bsa492>
- Stevenson, C. E. (2017). Role of Working Memory and Strategy-Use in Feedback Effects on children's Progression in Analogy Solving: an Explanatory Item Response Theory Account. *International Journal of Artificial Intelligence in Education, 27*(3), 393-418. <https://doi.org/10.1007/s40593-016-0129-5>
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving : Effects on Learning. *Cognitive Science, 12*(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Sweller, J. (2005). Implications of Cognitive Load Theory for Multimedia Learning. In R. Mayer (Éd.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (p. 19-30). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511816819.003>
- Sweller, J., & Chandler, P. (1994). Why Some Material Is Difficult to Learn. *Cognition and Instruction, 12*(3), 185-233. https://doi.org/10.1207/s1532690xci1203_1
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review, 10*(3), 46.
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. (2019). Cognitive Architecture and Instructional Design : 20 Years Later. *Educational Psychology Review, 31*(2), 261-292. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5>
- Tan, S. H. J., Wong, J. N., & Teo, W.-P. (2023). Is neuroimaging ready for the classroom? A systematic review of hyperscanning studies in learning. *NeuroImage, 281*, 120367. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120367>
- Tardif, J. (2007a). *Pour un enseignement stratégique : L'apport de la psychologie cognitive*. Les Ed. Logiques.
- Tommerdahl, J. (2010). A model for bridging the gap between neuroscience and education. *Oxford Review of Education, 36*(1), 97-109. <https://doi.org/10.1080/03054980903518936>
- Tulving, E. (1985). Memory and consciousness. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne, 26*(1), 1-12. <https://doi.org/10.1037/h0080017>
- Van De Ridder, J. M. M., Stokking, K. M., McGaghie, W. C., & Ten Cate, O. T. J. (2008). What is feedback in clinical education? : Feedback in clinical education. *Medical Education, 42*(2), 189-197. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2007.02973.x>

- Van der Kleij, F. M., Eggen, T. J. H. M., Timmers, C. F., & Veldkamp, B. P. (2012). Effects of feedback in a computer-based assessment for learning. *Computers & Education*, *58*(1), 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.020>
- Van der Kleij, F. M., Feskens, R. C. W., & Eggen, T. J. H. M. (2015). Effects of Feedback in a Computer-Based Learning Environment on Students' Learning Outcomes : A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, *85*(4), 475-511. <https://doi.org/10.3102/0034654314564881>
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1993). *L'inscription corporelle de l'esprit : Sciences cognitives et expérience humaine*.
- Varela, F., Lachaux, J.-P., Rodriguez, E., & Martinerie, J. (2001). The brainweb : Phase synchronization and large-scale integration. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(4), 229-239. <https://doi.org/10.1038/35067550>
- Vygotski, L. S., Sève, F., Piaget, J., Clot, Y., & Sève, L. (2015). *Pensée et langage*. La Dispute.
- Wallace, S., & Oxford University Press (Éds.). (2015). *A dictionary of education* (Second Edition). Oxford University Press.
- Wang, Z., Gong, S.-Y., Xu, S., & Hu, X.-E. (2019). Elaborated feedback and learning : Examining cognitive and motivational influences. *Computers & Education*, *136*, 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.04.003>
- Wheelahan, L. (2009). The problem with CBT (and why constructivism makes things worse). *Journal of Education and Work*, *22*(3), 227-242. <https://doi.org/10.1080/13639080902957913>
- Whelan, R. R. (2007). Neuroimaging of cognitive load in instructional multimedia. *Educational Research Review*, *2*(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2006.11.001>
- Wisniewski, B., Zierer, K., & Hattie, J. (2020). The Power of Feedback Revisited : A Meta-Analysis of Educational Feedback Research. *Frontiers in Psychology*, *10*, 3087. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.03087>
- Xu, K., Torgrimson, S. J., Torres, R., Lenartowicz, A., & Grammer, J. K. (2022). EEG Data Quality in Real-World Settings : Examining Neural Correlates of Attention in School-Aged Children. *Mind, Brain, and Education*, *16*(3), 221-227. <https://doi.org/10.1111/mbe.12314>
- Yang, K.-H. (2017). Learning behavior and achievement analysis of a digital game-based learning approach integrating mastery learning theory and different feedback models. *Interactive Learning Environments*, *25*(2), 235-248. <https://doi.org/10.1080/10494820.2017.1286099>
- Yazdani, A., Lee, J.-S., Vesin, J.-M., & Ebrahimi, T. (2012). Affect recognition based on physiological changes during the watching of music videos. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, *2*(1), 1-26. <https://doi.org/10.1145/2133366.2133373>
- Zimmerman, B. J. (2000). Chapter 2 - Attaining Self-Regulation : A Social Cognitive Perspective. In M. Boekaerts, P. R. Pintrich, & M. Zeidner (Éds.), *Handbook of Self-Regulation* (p. 13-39). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012109890-2/50031-7>