

[Page de garde]

HEC MONTRÉAL

**Effets du retour haptique sur l'apprentissage en situation de conduite
simulée: rôle de la propension individuelle au multitâche**

par
Julie Yin

**Pierre-Majorique Léger
HEC Montréal
Directeur de recherche**

**Ann-Frances Cameron
HEC Montréal
Codirectrice de recherche**

**Sciences de la gestion
(Spécialisation Expérience Utilisateur)**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maîtrise ès sciences en gestion
(M. Sc.)*

Février 2026
© Julie Yin, 2026

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

La présente atteste que le projet de recherche décrit ci-dessous a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains et qu'il satisfait aux exigences de notre politique en cette matière.

Projet # : 2025-6406

Titre du projet de recherche : Expérience de simulation en situation de conduite préventive

Chercheur principal : Pierre-Majorique Léger, Professeur titulaire, Technologies de l'information, HEC Montréal
Cochercheurs : Sylvain Sénécal; Constantinos K. Coursaris; Marc Fredette; Ann-Frances Cameron; Alexander John Karran; Thaddé Rolon-Mérette; Alejandra Ruiz Segura; Frédérique Bouvier; Luis Carlos Castiblanco; Juan Fernandez Shaw; David Brieugne; Salima Tazi; Xavier Côté; Élise Imbeault; Andrada Toma; Lucas Dietz; Rayane Benhenni; Julie Yin; Alice Gambaro; Shang Lin Chen

Date d'approbation du projet : 31 mars 2025

Date d'entrée en vigueur du certificat : 31 mars 2025

Date d'échéance du certificat : 01 mars 2026



Maurice Lemelin
Président
CER de HEC Montréal

Signé le 2025-03-31 à 14:49

Résumé

La conduite policière professionnelle exige une gestion simultanée de multiples tâches, notamment la communication radio, la navigation et le contrôle du véhicule, ce qui crée une charge cognitive élevée. Un enjeu central de la formation policière consiste donc à recréer des environnements d'apprentissage réalistes permettant de développer ces compétences multitâches sans exposer les apprenants à des risques opérationnels. Le retour haptique, en tant que canal perceptif, pourrait contribuer à soutenir l'attention en déchargeant partiellement les canaux visuelle et auditive, déjà fortement sollicitées en contexte multitâche. Cette étude s'inscrit dans l'objectif d'améliorer l'expérience d'apprentissage en simulateur en examinant si l'intégration du retour haptique renforce la performance et l'engagement cognitif. L'objectif du mémoire est d'évaluer l'effet du retour haptique sur l'effort perçu, la charge cognitive, le stress physiologique et la performance de conduite dans un simulateur immersif, ainsi que d'examiner le rôle modérateur des différences individuelles en multitâche, mesurées par la mémoire de travail (OSPAN) et la polychronicité. Vingt-cinq participants ont complété deux tâches de conduite à niveau faible et élevé en multitâche, avec ou sans retour haptique, dans un plan inter-intra-sujet. Les données subjectives, objectives et physiologiques ont été analysées par modèles mixtes. Les résultats indiquent que le retour haptique n'a pas réduit la charge cognitive perçue des conducteurs, ni amélioré directement leur performance. Toutefois, une légère hausse de l'activation physiologique a été observée en condition haptique, et l'effort perçu demeure négativement associé à la performance. Des tendances suggèrent également que les individus plus efficaces en multitâche pourraient mieux tirer parti de la stimulation haptique dans les contextes à forte demande multitâche. Ces résultats éclairent la manière dont l'haptique peut soutenir le développement des compétences multitâches en formation policière.

Mots clés : Apprentissage par simulation – Simulateurs d'entraînement – Retour haptique – Formation de professionnel – Conduite professionnelle – Plateforme de mouvement

Méthodes de recherche : Étude expérimentale – Simulateur de conduite – Fréquence cardiaque – Respiration – Mesures auto-reportées

Abstract

Professional police driving requires the simultaneous management of multiple tasks such as radio communication, navigation, and vehicle control, which generates a high cognitive workload. A central challenge in police training is therefore to recreate realistic learning environments that develop multitasking skills without exposing trainees to operational risks. Haptic feedback, as an additional perceptual channel, may help support attentional allocation by partially offloading the visual and auditory channels, which are heavily solicited in multitasking situations. This study contributes to the broader objective of improving learning experiences in driving simulators by examining whether the integration of haptic feedback enhances driving performance and cognitive engagement. The aim of this study is to assess the effect of haptic feedback on perceived workload, cognitive load, physiological stress, and driving performance in an immersive simulator, as well as to examine the moderating role of individual differences in multitasking, measured through working memory capacity (OSPAN) and polychronicity. Twenty-five participants completed two driving tasks with low and high multitasking demands, with and without haptic feedback, in a within-subjects design. Subjective, objective, and physiological data were analyzed using mixed-effects models. Results indicate that haptic feedback did not reduce perceived cognitive load nor directly improve performance. However, a slight increase in physiological activation was observed in the haptic condition, and perceived effort remained negatively associated with performance. Trends also suggest that participants with higher multitasking efficiency may benefit more from haptic stimulation in high-demand multitasking scenarios. These findings provide insights into how haptic feedback may support the development of multitasking skills in police training.

Keywords: Simulation-based learning – Training simulators – Haptic feedback – Professional training – Professional driving – Motion platform

Research methods: Experimental study – Driving simulator – Heart rate – Breath rate – Self-reported measures

Table des matières

Table des matières

Résumé.....	iv
Abstract	v
Table des matières.....	iv
Avant-propos.....	vii
Liste des tableaux et des figures	viii
Remerciements.....	ix
Chapitre 1: Introduction.....	1
1.1 Conduite préventive.....	1
1.2 Problématique scientifique.....	2
1.3 Objectifs de recherche et hypothèses	4
1.4 Approche méthodologique et considérations éthiques	4
1.5 Structure du mémoire et contribution au domaine.....	5
Chapitre 2 : Apprentissage en conduite simulée : effets du retour haptique et influence de la propension individuelle au multitâche	6
Abstract	6
2.1 Introduction.....	7
2.2 Revue de littérature.....	10
2.2.1 Tavaux connexes.....	10
2.2.2 Charge cognitive	13
2.2.3 Multitasking	15
2.3 Méthodologie	19

2.3.1 Design expérimental	19
2.3.2 Paradigme expérimental.....	20
2.3.3 Stimuli expérimentaux	22
2.3.4 Instruments et équipement de laboratoire	23
2.3.5 Mesures	25
2.3.6 Participants.....	28
2.3.7 Procédure	29
2.3.8 Analyses statistiques	31
2.4 Résultats	32
2.4.1 Statistiques descriptives	32
2.4.2 Les tests et la validation des hypothèses.....	33
2.5 Discussion	44
2.5.1 Interprétation des résultats principaux	45
2.5.2 Rôle du multitâche et des différences individuelles	47
2.5.3 Implications.....	48
2.5.4 Limites de l'étude	50
2.5.5 Pistes de recherche futures	51
2.6 Conclusion	52
Références.....	54
Chapitre 3 : Conclusion	62
3.1 Retour sur l'étude.....	62
3.2 Résultats et mise en perspective théorique	63
3.2 Implications pratiques.....	65
3.4 Limites de l'étude	66
5. Pistes de recherche futures.....	67

Bibliographie.....	69
Annexes.....	i
Annexe A – Description des tâches supplémentaires (T3 à T7).....	i
Annexe B : Déroulement de l’expérience complète	ii
Annexe C : Échelles de mesure	iii

Avant-propos

Ce mémoire en expérience utilisateur a été soumis avec l'autorisation de la direction administrative du programme de la Maîtrise en Science de la gestion (M.Sc) de HEC Montréal.

Le projet de recherche lié à ce mémoire a obtenu l'approbation du comité d'éthique en recherche (CER) de HEC Montréal sous le numéro de projet #2025-6406. Un article scientifique issu du projet est inclus dans ce mémoire.

Au cours de la préparation de ce travail, un outil d'intelligence artificielle (ChatGPT) a été utilisé afin de structurer ce mémoire et réviser la grammaire et l'orthographe. Après l'utilisation de cet outil, les auteurs ont revu et modifié le contenu au besoin et assument l'entière responsabilité du contenu de la version finale publiée.

L'article est actuellement en préparation pour soumission au journal International *Journal of Human-Computer Interaction*.

Liste des tableaux et des figures

Tableaux

Tableau 1. Liste des hypothèses.....	18
Tableau 2. Résumé des mesures utilisées pour l'étude.....	27
Tableau 3. Répartition des profils d'étude par genre	28
Tableau 4. Statistiques descriptives de la présence ou l'absence du retour haptique par tâche ...	32
Tableau 5. Résumé des hypothèses et de leurs résultats	43

Figures

Figure 1. Représentation visuelle résumant les hypothèses et le modèle de recherche	19
Figure 2. Plan factoriel manipulant le niveau de demande multitâche et le retour haptique	20
Figure 3.Exemple visuel d'OSPAN.....	22
Figure 4. Exemple visuel de la configuration du laboratoire et des simulateurs de conduite.....	24
Figure 5. Illustration de la distance du centre de la voie	26
Figure 6. Déroulement complet de la procédure expérimentale	31
Figure 7. Modèle de recherche avec résultats des hypothèses.....	44

Remerciements

Choisir de me lancer dans la recherche a été un véritable tournant dans ma vie, un chemin que je n'aurais jamais imaginé emprunter. La version plus jeune de moi-même aurait sans doute été surprise, mais aujourd'hui, je suis profondément reconnaissante d'avoir fait ce choix. La science a toujours suscité mon intérêt, même si mon parcours initial a surpris plus d'une personne. Aujourd'hui, il me conduit vers les sciences de la gestion; comme quoi tous les chemins mènent à Rome.

Je tiens à remercier à toute l'équipe du Tech3Lab, ainsi qu'à notre partenaire d'affaires D-Box, sans qui ce projet n'aurait jamais vu le jour. Un merci tout particulier à mes directeurs de mémoire, Pierre-Majorique Léger et Anne-Frances Cameron, ainsi qu'aux autres membres du Tech3Lab, pour leurs conseils, leur confiance et leur engagement qui ont permis à cette thèse d'aboutir.

Au fil de ce parcours, j'ai eu la chance de poursuivre cette aventure académique avec des amies rencontrées au baccalauréat, Elizabeth Parniuk et Lyan Nguyen. Même en travaillant sur des projets différents, nous avons traversé ensemble les hauts et les bas de ce chemin et leur présence a toujours été un grand soutien.

Et puis, il y a ces rencontres qui transforment un simple projet en véritable aventure humaine. Je souhaite remercier ma partenaire de projet, Alice Gambaro, avec qui j'ai eu la chance de partager bien plus que des analyses et des échéanciers. Alice, c'est la personne qui a su faire naître des éclats de rire au milieu de la fatigue, qui a apporté de l'élan dans les moments de doute et qui a rendu chaque étape un peu plus lumineuse et enrichissante. Je n'aurais pas pu demander meilleure partenaire. Notre collaboration a laissé des traces que je garderai longtemps en mémoire et des souvenirs profondément précieux.

Je souhaite aussi remercier Zayne, celui qui, sans grands mots ni éclats, a su apporter une présence réconfortante dans les moments de fatigue et de doute. Sa présence constante m'a offert un apaisement que je ne saurais tout à fait expliquer et cela a compté plus qu'il ne l'imagine.

Enfin, je laisse une pensée ici à mon grand-père qui nous a quitté pendant la rédaction de ce mémoire. Puis une autre pensée à tous les membres de ma famille et à mes proches, qui ne savaient

peut-être pas concrètement ce que je faisais, mais qui me supportait à distance avec des petits mots d'encouragement et avec l'idée que j'allais réussir ce *milestone* de ma vie. Mes parents, comme une grande partie de ma famille, ont vécu la guerre et la menace du génocide au Cambodge dans les années 70. Ils ont choisi de tout quitter pour venir au Canada, animés par l'espoir d'une meilleure vie et d'un avenir plus sûr. Si je suis ici aujourd'hui, c'est en grande partie grâce à leur courage et leurs sacrifices. Étant la 1^{ère} génération d'une famille immigrée au Québec, je peux maintenant dire fièrement dire que je suis la première de ma famille à obtenir une maîtrise.

Chapitre 1: Introduction

1.1 Conduite préventive

Chaque année, les collisions routières représentent une cause importante de blessures et de décès. Au Canada, plus de 1 600 personnes perdent la vie chaque année dans des accidents de la route, et plusieurs milliers d'autres subissent des blessures graves (Transports Canada, 2025). En 2023, la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ) a rapporté 380 décès, 1 270 blessés graves et 26 790 blessés légers liés à des accidents de la route au Québec (SAAQ, 2024). Bien que ce chiffre représente une diminution de 4,9% par rapport à 2022, chaque vie perdue rappelle la gravité persistante de la situation (SAAQ, 2024). Ces événements tragiques ont des répercussions profondes, non seulement pour les familles endeuillées, mais aussi pour la société québécoise dans son ensemble. La sécurité routière demeure donc un enjeu collectif majeur, nécessitant des stratégies durables et innovantes pour réduire les accidents et leurs conséquences humaines.

Dans cette optique, la conduite préventive, fondée sur l'anticipation des dangers et la vigilance active sur les routes, est reconnue comme un levier essentiel pour diminuer les risques (Office québécois de la langue française, s. d.). Cependant, l'efficacité de cette approche dépend en grande partie de la formation et de la préparation des conducteurs, un enjeu d'autant plus crucial dans les professions en contexte d'urgence où les exigences attentionnelles sont extrêmement sollicitées. Pour les policiers, la conduite n'est pas simplement un moyen de déplacement. Elle constitue une composante opérationnelle critique de leur métier. Patrouiller, répondre à des appels d'urgence, poursuivre un véhicule ou sécuriser une scène d'intervention exigent de mobiliser simultanément des compétences de conduite, de communication, de vigilance et de prise de décision rapide sous pression (Zahabi et al., 2023). La conduite policière se distingue ainsi de la conduite civile par un niveau de charge attentionnelle plus élevé et par une exposition accrue à des situations à risque, où la moindre erreur peut avoir des conséquences humaines, juridiques ou organisationnelles considérables. Dans ce contexte, la formation des aspirants policiers revêt d'une importance cruciale. Elle vise non seulement à développer des habiletés techniques de conduite, mais aussi à renforcer la capacité à gérer des environnements dynamiques et imprévisibles. Face à ces défis, les simulateurs de conduite

immersive se sont imposés comme des environnements pédagogiques sécuritaires, contrôlés et reproductibles pour la formation policière. Ils permettent de recréer des scénarios réalistes, sans compromettre la sécurité des apprenants, ni celle du public. Toutefois, même dans ces environnements protégés, les tâches complexes mobilisant plusieurs canaux sensoriels peuvent générer une surcharge cognitive, réduisant la performance et l'efficacité de l'apprentissage (Zahabi et al., 2023).

C'est dans cette perspective que le retour haptique, soit la transmission d'informations par le toucher à travers des mouvements vibrocinétiques, apparaît comme une solution prometteuse pour améliorer la gestion cognitive de la conduite. En exploitant le canal tactile, ce type de signal peut redistribuer la charge mentale entre les modalités sensorielles et soutenir l'attention dans des contextes multitâches (Meng & Spence, 2015). Son efficacité a été démontrée dans d'autres domaines à haute responsabilité, tels que l'aviation, la médecine chirurgicale et la conduite professionnelle, où il améliore la détection des événements critiques, stabilise la trajectoire et réduit les temps de réaction (Okamura, 2009; Petermeijer et al., 2014; Van Baelen et al., 2021). Ainsi, le recours à l'haptique en formation policière s'inscrit au croisement de deux enjeux contemporains: renforcer la sécurité routière par la réduction des erreurs attentionnelles au volant et optimiser les approches pédagogiques en simulation immersive grâce à des technologies multisensorielles. Malgré l'intérêt croissant pour cette approche, peu d'études ont examiné de manière empirique l'effet du retour haptique dans un contexte de conduite policière simulée, d'où la pertinence et la contribution de la présente recherche.

1.2 Problématique scientifique

Bien que le retour haptique ait démontré son potentiel dans des domaines exigeants, tels que l'aviation (Baelen et al., 2021) et la chirurgie simulée (Okamura, 2009), son application dans la conduite policière demeure peu explorée. Or, ce contexte se caractérise par des exigences cognitives particulièrement élevées. Le métier policier impose un degré de multitâche particulièrement élevé: conduite à haute vitesse, traitement d'informations radios, interaction avec les systèmes, surveillance environnementale, prise de décision rapide, parfois dans des conditions émotionnellement chargées (Sanders et al., 2012). Ces exigences sollicitent fortement les ressources attentionnelles de l'individu et augmentent le risque d'erreurs, de collisions ou de mauvaise allocation de l'attention. La littérature scientifique a mis en évidence

que la distraction, qu'elle soit cognitive, visuelle ou manuelle, est l'un des principaux facteurs de collisions liés à la conduite (Caird et al., 2014; Horrey & Wickens, 2006; Strayer & Johnston, 2001). En particulier, les tâches secondaires, telles que l'utilisation d'une radio ou la consultation d'un terminal de bord dans ce contexte policier, créent des conflits de ressources qui nuisent à la performance (Wickens, 2008). Or, les programmes actuels de formation policière se concentrent encore majoritairement sur l'apprentissage technique de la conduite et la gestion du véhicule, mais abordent peu la gestion intégrée de la charge cognitive et des tâches simultanées. Des études ont montré que le retour haptique, lorsqu'il est correctement conçu, permettent d'alléger la charge cognitive en transférant une partie de l'information vers le canal tactile, moins sollicité que les canaux visuel et auditif (Gaffary & Lécuyer, 2018; Meng & Spence, 2015; S. M. Petermeijer, Abbink, & de Winter, 2015). Toutefois, ces travaux concernent principalement des conducteurs civils en conditions de distraction, des systèmes d'aide à la conduite ou de sécurité avancée (ADAS) ou des contextes d'alerte de collision et de maintien dans la voie.

Par ailleurs, la littérature examine peu la manière dont le retour haptique interagit avec les différences individuelles, telles que la capacité à gérer plusieurs tâches simultanément, ou la polychronicité, c'est-à-dire la préférence naturelle pour le multitâche, ou encore la manière dont les différents profils cognitifs influencent l'efficacité perçue ou réelle du retour haptique en situation complexe (Bluedorn et al., 1999). De manière générale, les travaux s'intéressent davantage aux effets globaux du retour haptique qu'aux variations interindividuelles susceptibles d'en moduler l'efficacité. Ces variables pourraient pourtant expliquer pourquoi certains apprenants profitent davantage des signaux haptiques que d'autres et orienter vers une personnalisation pédagogique des outils immersifs.

Enfin, les travaux existants se focalisent majoritairement sur les performances objectives de conduite (vitesse, trajectoire, collisions), mais peu d'études considèrent simultanément la performance de rétention d'informations, les mesures subjectives de charge cognitive et les indicateurs physiologiques du stress liés à la conduite. Ce triple regard subjectif, comportemental et physiologique permettrait pourtant une compréhension plus fine de l'impact du retour haptique sur l'attention et la performance en condition d'apprentissage. Ces

lacunes justifient la pertinence d'une étude combinant la simulation de conduite policière, retour haptique et prise en compte des différences individuelles dans la gestion du multitâche.

1.3 Objectifs de recherche

Dans la continuité des constats présentés précédemment, cette recherche vise à examiner de manière systématique le rôle du retour haptique au sein d'un environnement de simulation policière immersif. Plus précisément, elle cherche à déterminer si l'ajout de mouvements vibrocinétiques, configurées pour reproduire les mouvements d'un véhicule réel, peut contribuer à réduire la charge mentale, soutenir la performance de conduite et faciliter l'apprentissage dans différents contextes de conduite. L'objectif général du mémoire est donc d'évaluer dans quelle mesure le retour haptique peut agir comme un soutien attentionnel et perceptif face à une tâche de conduite, et de vérifier si cet effet varie selon le niveau de demande multitâche requis par la tâche, ainsi que selon les caractéristiques individuelles des participants, notamment leur capacité multitâche et leur polychronicité. Pour répondre à cette question, cinq objectifs spécifiques ont été formulés, soit évaluer l'effet direct du retour haptique sur la charge cognitive, examiner le lien entre la charge cognitive et la performance de conduite, ainsi que la performance de rétention, tester l'effet direct du retour haptique sur la performance, analyser l'influence du niveau de demande multitâche sur cet effet et enfin examiner le rôle des différences individuelles dans l'efficacité du retour haptique.

1.4 Approche méthodologique et considérations éthiques

Cette étude a adopté un design expérimental mixte inter-intra-sujets. Tous les participants ont réalisé l'ensemble des scénarios de conduite dans un simulateur de conduite reproduisant un véhicule de patrouille policière, avec une alternance de conditions haptiques. Ce plan mixte inter-intra-sujet permettait de comparer chaque participant à lui-même selon les conditions de tâche et du retour haptique. L'ordre d'exposition aux conditions haptiques a été randomisé afin de réduire les biais d'apprentissage ou de fatigue à travers deux tâches de différents niveaux de demande multitâche. L'étude a été menée auprès de 25 étudiants en Techniques policières inscrits dans un programme collégial. Ce choix d'échantillon permettait de se rapprocher du profil réel des apprenants en contexte de formation. L'ensemble du projet a été approuvé par comité d'éthique en recherche (CER) de HEC Montréal sous le numéro de projet #2025-6406.

La collecte des données s’effectuait ensuite via plusieurs instruments : mesures physiologiques grâce à la veste Hexoskin, questionnaires subjectifs sur tablette, enregistrements vidéo via le logiciel Capture, ainsi que des données objectives du simulateur et sur ordinateur.

Contribution de l’étudiant aux étapes du projet de recherche	
Étapes	Contribution
Développement de la problématique et de la question de recherche	Contribution : 90% ▪ Contextualisation ▪ Traduction des besoins du partenaire industriel en question de recherche et définition de la problématique
Revue de la littérature	Contribution : 90% ▪ Recherche de la littérature existante ▪ Identification des sujets de recherche ▪ Sélection des échelles et mesures à utiliser Rédaction de la revue de la littérature : 100%
Demande de certificat d’éthique de la recherche	Contribution : 50% ▪ Rédaction de la demande au CER et des modifications de projet par la suite
Design expérimental	Contribution : 50% ▪ Conception du design expérimental et protocoles de test ▪ Organisation des salles de collecte et organisation du matériel
Recrutement des participants	Contribution : 75% ▪ Rédaction du questionnaire de recrutement ▪ Recrutement et gestion des participants
Prétests et collecte de données	Contribution : 90% ▪ Responsable des opérations lors des prétests et tests ▪ Présence lors du processus de collecte ▪ Gestion et communication avec le partenaire
Extraction et transformation des données	Contribution : 80%
Analyse des données	Contribution : 70%
Rédaction	Contribution : 100%

1.5 Structure du mémoire et contribution au domaine

Ce mémoire par article s’inscrit dans une démarche de recherche visant à approfondir la compréhension du rôle du retour haptique dans l’apprentissage de la conduite simulée en contexte policier. Il adopte une structure qui relie le cadre théorique, les résultats empiriques et leurs retombées scientifiques et professionnelles. L’étude présente d’abord la problématique

de la surcharge cognitive en conduite policière et les lacunes de la littérature, avant d'examiner les effets du retour haptique sur la charge mentale, la performance et leurs modérateurs individuels. Elle décrit ensuite la méthodologie expérimentale employée, expose les principaux résultats relatifs aux hypothèses posées, et les discute à la lumière des théories existantes. Enfin, le mémoire met en perspective les contributions scientifiques et pratiques de la recherche, en soulignant son apport pour la formation policière et en formulant des recommandations pour de futurs travaux sur l'intégration du retour haptique dans les environnements de simulation immersive. Cette recherche apporte trois contributions principales. Sur le plan scientifique, elle propose un modèle expérimental combinant retour haptique, scénarios multitâches réalistes et mesures subjectives, objectives et physiologiques, tout en intégrant les différences individuelles, telles que la capacité multitâche et la polychronicité. Sur le plan méthodologique, elle illustre l'application rigoureuse de modèles mixtes dans un environnement de simulation immersive dans un contexte policier. Enfin, sur le plan opérationnel, elle met en lumière la valeur du retour haptique comme outil de soutien à l'apprentissage.

Chapitre 2 : Apprentissage en conduite simulée : effets du retour haptique et influence de la propension individuelle au multitâche

Abstract

La conduite policière professionnelle requiert une gestion simultanée de multiples tâches, notamment la communication radio, la navigation et le contrôle du véhicule, qui induit une haute charge cognitive. Un enjeu central de la formation policière consiste à recréer des environnements d'apprentissage réalistes permettant de développer ces compétences multitâches sans exposer les apprenants à risques opérationnels. Le retour haptique, en tant que canal perceptif additionnel, pourrait soutenir la répartition attentionnelle en allégeant la pression exercée sur les canaux visuel et auditif, particulièrement sollicitées en contexte multitâches. Cette étude s'inscrit ainsi dans l'objectif d'améliorer l'expérience d'apprentissage sur simulateur en examinant si l'intégration du retour haptique renforce la performance et l'engagement cognitif. Dans ce mémoire, nous évaluerons l'effet du retour haptique sur l'effort perçu, la charge cognitive, le stress physiologique et la performance de conduite, tout en

considérant les différences individuelles en multitâche mesurées par la mémoire de travail (OSPAN) et la polychronicité. Vingt-cinq participants ont réalisé deux tâches de conduite à faible et forte demande en multitâche, avec ou sans retour haptique, dans un plan mixte inter-intra-sujet. Les mesures subjectives, objectives et physiologiques ont été analysées à l'aide de modèles mixtes. Les résultats indiquent que le retour haptique n'a pas réduit la charge cognitive perçue, ni amélioré directement la performance. Toutefois, une légère hausse d'activation physiologique a été observée en condition haptique ($p = 0.07$), et l'effort perçu demeure négativement associé à la performance ($p = 0.071$). Certaines tendances suggèrent que les individus présentant une efficacité multitâche plus élevée pourraient tirer davantage profit de la stimulation haptique lorsque la demande multitâche est élevée. Ces résultats apportent un éclairage nuancé sur la manière dont le retour haptique peut soutenir le développement des compétences multitâches en conduite policière, soulignant que son efficacité dépend à la fois des exigences de la tâche et des profils cognitifs des apprenants.

2.1 Introduction

Dans le domaine de la sécurité routière, la charge cognitive est un concept central. Conduire est loin d'être une activité automatique. Le conducteur doit surveiller la route, lire les panneaux, rester attentifs aux véhicules aux alentours, anticiper les dangers, contrôler la vitesse et parfois réagir instantanément à des événements inattendus. Quand des distractions surviennent et que le contexte exige de traiter plusieurs informations simultanément, les ressources attentionnelles et de traitement perceptif sont sollicitées intensément. Cela dit, certaines professions imposent la conduite comme activité quotidienne, tout en exigeant de maintenir un haut niveau de sécurité sur les routes. Cette exigence crée un contexte où la surcharge cognitive devient un enjeu critique. Dans ce cadre, comprendre les comportements multitâches (*multitasking*) occupe une place centrale. De nombreuses professions exigent en effet d'exécuter plusieurs tâches en parallèle pendant la conduite, comme communiquer, naviguer, évaluer l'environnement et prendre des décisions critiques. Or, ces tâches concurrentes peuvent solliciter les mêmes ressources cognitives, tel que la mémoire de travail, l'attention, la planification ou les capacités perceptivo-motrices, et ceux-ci entraînent donc des coûts de performance (Pashler, 1994; Salvucci & Taatgen, 2008; Wickens, 2008). Le modèle de la *threaded cognition* de Salvucci et Taatgen (2008) postule que, même lorsque deux tâches

semblent réalisées en parallèle, elles doivent souvent passer par une même ressource procédurale séquentielle, de prise de décision et de planification, qui peut être une source de ralentissements ou d'erreurs (Salvucci & Taatgen, 2008). Dans ce cadre théorique, le multitâche apparaît non seulement comme un défi comportemental, mais aussi comme une limite structurale du système cognitif humain, particulièrement lorsque la tâche principale implique déjà une forte demande attentionnelle, comme la conduite. Les différences individuelles jouent également un rôle important: ceux qui disposent d'une plus grande capacité de mémoire de travail, c'est-à-dire la capacité cognitive qui garde l'information active et permet de rester concentré malgré les distractions, ou d'une meilleure aptitude à hiérarchiser les tâches obtiennent de meilleures performances en contexte multitâche (Conway et al., 2005). Les différences individuelles amplifient cette dynamique. Certaines personnes disposent d'une mémoire de travail plus efficace ou d'une meilleure capacité à prioriser les tâches, ce qui les rend moins vulnérables à la surcharge en contexte multitâche. Ces variations individuelles soulignent aussi l'importance de concevoir des environnements d'apprentissage capables non seulement de reproduire la complexité du terrain, mais aussi de soutenir le développement de compétences transférables à des contextes opérationnels réels.

Afin de limiter les risques, les environnements simulés sont donc largement utilisés dans la formation professionnelle, que ce soit pour les conducteurs, les pilotes, les ambulanciers ou les policiers. Ces dispositifs permettent de créer des contextes sécuritaires, tout en reproduisant des conditions réalistes du terrain. Dans la formation policière, les interventions en milieu urbain nécessitent de gérer simultanément la conduite, la communication radio et la prise de décision rapide, ce qui impose un niveau de multitâche particulièrement élevé. Une allocation sous-optimale des ressources cognitives augmente alors les risques d'erreur. Ce contexte crée une expérience de formation intrinsèquement multitâche, où la surcharge cognitive peut freiner l'apprentissage si l'environnement pédagogique ne parvient pas à soutenir adéquatement l'attention des apprenants. Selon la *cognitive load theory*, un apprentissage efficace repose sur une répartition équilibrée des ressources mentales entre trois composantes : la charge intrinsèque, liée aux exigences propres à la tâche; la charge extrinsèque, produite par la manière dont l'information est présentée; et la charge pertinente, ou « germane », qui correspond à l'effort investi dans la construction de schémas mentaux utiles à la compétence visée (Paas et al., 2004; Sweller, 1988). Dans un simulateur de conduite policière, maintenir cet équilibre

devient un défi stratégique, puisque la formation vise non pas à simplifier l'activité, mais à offrir un environnement immersif qui reproduit fidèlement les contraintes du terrain tout en soutenant le traitement cognitif. Si la charge extrinsèque est trop élevée, l'apprenant risque d'être submergé, ce qui nuit à la rétention et limite le transfert vers la pratique sur terrain.

Face à ces contraintes, le retour haptique constitue un levier prometteur, puisqu'il sollicite le canal tactile, souvent sous-exploité pour construire un environnement immersif propice à l'apprentissage. Ce type de retour peut prendre la forme de vibrations, de forces ou de mouvements tactiles qui exploite un canal sensoriel. En conduite, des signaux vibrocinétiques intégrés au volant, au siège ou à la ceinture ont démontré leur efficacité pour améliorer le suivi de trajectoire, accélérer la détection d'écarts de voie et réduire la dépendance au visuel (Petermeijer et al., 2014). Des revues récentes confirment que l'haptique bien conçu améliore la performance et l'apprentissage, notamment lorsqu'il fournit un *feedback* informatif par guidage ou alertes plutôt que distractif (Baelen et al., 2021; Okamura, 2009). Ces bénéfices sont renforcés par des travaux récents en contexte de doubles tâches. L'étude de Wang & Ren (2024) a démontré que la combinaison d'une guidance visuelle et d'une guidance haptique permet non seulement de réduire le temps de réaction, mais aussi d'améliorer l'expérience utilisateur, tout en maintenant l'attention visuelle centrée sur la tâche principale (Wang et al., 2024). En redistribuant une partie de l'information vers le canal tactile, l'haptique permet ainsi de réduire la surcharge imposée aux modalités déjà fortement sollicitées et pourrait, en principe, favoriser un apprentissage mieux ancré et plus transférable.

Reste toutefois une question essentielle pour la formation policière : cet avantage se maintient-il lorsque la demande multitâche augmente, comme c'est le cas en intervention réelle? En considérant que la surcharge cognitive représente un enjeu majeur en sécurité routière et que les policiers sont régulièrement confrontés à des situations multitâches, l'intégration du retour haptique en formation apparaît comme une piste particulièrement prometteuse, dont l'efficacité pourrait toutefois varier en fonction du degré de sollicitation cognitive imposé par la tâche. Ces dispositifs pourraient non seulement aider à mieux gérer la charge mentale, mais aussi soutenir le développement des compétences nécessaires à la conduite policière en contexte multitâche. Leur utilisation en simulation de conduite permettrait de réduire les coûts

attentionnels, d'améliorer la performance et de mieux préparer les agents à la gestion multitâche qu'ils rencontreront inévitablement en contexte opérationnel.

Dans ce contexte, cette thèse s'intéresse à l'impact du comportement multitâche sur la relation entre retour haptique et performance de conduite sur un simulateur chez les policiers en formation. Nous nous pencherons plus précisément sur les questions de recherche suivantes :

***QR1.** Dans quelle mesure l'expérience avec retour haptique améliore la formation dans un contexte multitâche?*

***QR2.** Les individus ayant une plus grande propension au multitâche en tirent-ils encore plus de bénéfices?*

La présente recherche se distingue en explorant l'effet du multitasking en contexte de conduite lorsqu'il est combiné à l'usage de dispositifs haptiques dans un simulateur de formation policière. Si les bénéfices du retour haptique ont déjà été étudiés dans des environnements, tels que la conduite automobile auprès du grand public ou encore la formation aéronautique et médicale, très peu de travaux se sont penchés sur son intégration dans le domaine policier (Baelen et al., 2021; Okamura, 2009; Petermeijer, Abbink, Mulder, et al., 2015). Or, ce contexte professionnel est caractérisé par une forte demande multitâche gestion simultanée de la conduite, de la communication radio et de la prise de décision tactique qui accroît la charge cognitive et le risque d'erreurs (Salvucci & Taatgen, 2011). En combinant l'étude du comportement multitâche avec l'évaluation de l'apport du retour haptique sur la performance de conduite, ce mémoire propose d'apporter des connaissances nouvelles sur un champ encore peu documenté. Ces résultats visent à éclairer non seulement la littérature scientifique en ergonomie et en interaction homme-machine, mais également les pratiques simulées de formation policière, où l'intégration d'un canal sensoriel supplémentaire pourrait représenter un levier pédagogique et sécuritaire intéressant.

2.2 Revue de littérature

2.2.1 Travaux connexes

La littérature sur la formation professionnelle mobilisant des simulateurs met en évidence le potentiel du retour haptique pour soutenir l'apprentissage et la performance lorsque la charge

cognitive est élevée. En conduite, plusieurs travaux montrent que des signaux tactiles (vibration directionnelle, guidage de couple au volant, impulsions sur siège, ceinture ou pédales) améliorent la tenue de voie, accélèrent la réaction aux événements critiques et délestent les canaux visuel et auditif, souvent saturés en contexte multitâche. Des revues et études expérimentales concluent que des signaux vibrocinétique bien conçus facilitent l'évitement de collision et orientent l'attention plus efficacement que des alertes purement visuelle ou sonores, avec des bénéfices sur le temps de réaction et la stabilité de trajectoire (Meng & Spence, 2015). Dans les simulateurs de conduite professionnelle, le guidage haptique continu appliqué au volant (*haptic shared control*) améliore de manière fiable le maintien dans la voie et est généralement mieux accepté que des guidages de type « bandwidth » (autorité intermittente) (Petermeijer, Abbink, & de Winter, 2015). Cette étude montre des gains sur la variabilité latérale et des évaluations subjectives plus favorables au guidage haptique continu, tout en appelant à documenter les effets à long terme dans les programmes de formation (Petermeijer, Abbink, & de Winter, 2015). Au-delà du volant, des études explorent des interfaces haptiques multimodales: vibrations directionnelles au siège (pour signaler une dérive ou une menace latérale), impulsions sur les pédales (économie de freinage ou de distance de sécurité) ou sur la ceinture (alerte de changement de voie non intentionnel). Ces dispositifs, testés sur des simulateurs de conduite avancés, rapportent des réductions du temps de réaction et de la charge perçue par rapport à des configurations sans haptique ou avec alertes visuelles et sonores exclusives, ce qui renforce leur intérêt pour la formation en environnement multitâche (Tijerina et al., 2000).

Ainsi, conformément aux modèles attentionnels et aux résultats empiriques, nous anticipons que le retour haptique contribue à alléger la charge mentale en contexte de conduite.

H1a : La présence du retour haptique réduit l'effort perçu lors de la tâche de conduite.

H1b : La présence du retour haptique réduit la charge cognitive perçue.

H1c : La présence du retour haptique réduit l'activation physiologique liée au stress.

Toujours dans une perspective de formation, des travaux récents étudient l'haptique dans des transitions d'automatisation (ex. par reprise de contrôle) et dans des AV (véhicule autonome)

et ADAS (systèmes avancés d'aide à la conduite) centrés apprentissage, où des outils vibrotactiles portés (ex. bracelet) ou embarqués guident l'orientation attentionnelle et la manœuvre. Les résultats suggèrent des réponses plus rapides et une meilleure compatibilité avec une conduite focalisée sur l'environnement routière (Bazilinskyy et al., 2018). Ces approches sont pertinentes pour les outils d'entraînement qui exposent les apprenants à des scénarios de charge élevée et nécessitent un canal de guidage peu intrusif.

Les bénéfices du retour haptique en formation professionnelle ne se limitent pas à la conduite routière. Dans le domaine de l'aéronautique, plusieurs études menées auprès de pilotes en simulateur ont examiné l'intégration de dispositifs haptiques dans le contrôle de vol, tels que l'augmentation de la raideur du manche ou des systèmes de guidage positionnel. Ces dispositifs contribuent à prévenir les sorties de l'enveloppe de vol (dans les limites de vol sécuritaires), à stabiliser le pilotage dans des contextes exigeants et à offrir un retour sensoriel supplémentaire aux instruments de bord. Ainsi, le retour haptique est considéré comme une approche pertinente et crédible pour l'entraînement aux manœuvres inhabituelles ou critiques (Baelen et al., 2021). En médecine, la formation sur simulateur chirurgical s'appuie sur un ensemble de travaux démontrant que le retour haptique, qu'il soit de force ou tactile, favorise le développement de la dextérité, améliore la perception des tissus et facilite l'apprentissage de gestes techniques précis chez les novices. La revue d'Okamura en fait référence : son étude synthétise les défis techniques et les gains pédagogiques observés dans des tâches chirurgicales simulées (Okamura, 2009). Un parallèle utile pour la conception d'exercices haptiques en conduite où la précision motrice et la perception de contraintes mécaniques doivent être apprises sans risque réel (Okamura, 2009).

En somme, les travaux connexes convergent : dans des formations où les opérateurs évoluent sous forte charge cognitive et en multitâche (conduite professionnelle, pilotage, chirurgie), le retour haptique constitue un levier pédagogique pour redistribuer l'information vers le canal tactile, améliorer la prise de décision et stabiliser la performance motrice. Ces résultats justifient son intégration dans les simulateurs de formation et motivent l'évaluation de paramètres de conception (type de signal, localisation, *timing*) adaptés aux objectifs d'apprentissage propres à chaque métier (Meng & Spence, 2015).

Dans ce contexte où la conduite professionnelle requiert une gestion simultanée de multiples flux d'information, l'haptique constitue un levier pour améliorer la performance globale.

H3 : La présence du retour haptique améliore la performance de conduite.

2.2.2 Charge cognitive

La charge cognitive constitue un concept central pour comprendre la manière dont les individus traitent l'information et maintiennent leur performance lors de tâches complexes comme la conduite automobile. La théorie de la charge cognitive (Paas et al., 2004; Sweller, 1988) postule que la mémoire de travail possède une capacité limitée pour traiter simultanément plusieurs éléments d'information. Lorsque les exigences d'une tâche excèdent ces ressources, la performance se détériore, et l'apprentissage, dans un contexte de formation, s'en trouve compromis. Cette théorie distingue trois composantes de la charge cognitive : la charge intrinsèque (liée à la complexité inhérente de la tâche), la charge extrinsèque (issue de la manière dont l'information est présentée ou des conditions d'exécution), et la charge essentielle (dédiée à la construction de schémas mentaux) (Paas et al., 2004; Sweller, 1988).

En contexte de conduite, la charge cognitive résulte principalement d'un chevauchement de ressources attentionnelles entre plusieurs tâches simultanées, un phénomène largement expliqué par la Multiple Resource Theory (Wickens, 2008). Selon ce modèle, les interférences surviennent lorsque des tâches concurrentes sollicitent les mêmes modalités sensorielles (visuelle ou auditive), les mêmes codes (verbal ou spatial) ou les mêmes étapes de traitement. Dans cette perspective, la conduite mobilise fortement la modalité visuelle et les processus spatiaux, ce qui laisse peu de capacité attentionnelle disponible pour gérer efficacement une communication radio, une navigation ou la surveillance d'événements imprévus. Les modèles cognitifs du multitâche, notamment la théorie de la *Threaded Cognition* (Salvucci & Taatgen, 2011), décrivent également comment les tâches en parallèle se disputent un «goulot procédural» qui ne peut traiter qu'une action à la fois, générant délais, erreurs et surcharge cognitive lorsque les demandes dépassent la capacité du système cognitif.

Ces contraintes se reflètent directement dans la performance. De nombreuses études montrent qu'une augmentation de la charge cognitive se traduit par une dégradation de divers indicateurs de conduite. Par exemple, une surcharge mentale, mesurée par le NASA-TLX, conduit à une

diminution de la stabilité latérale, un allongement des temps de réaction et une augmentation des erreurs (Brookhuis & de Waard, 2010). Dans les tâches motrices complexes, telle que la chirurgie robotique, une charge cognitive élevée augmente la probabilité d'erreurs, réduit la précision des gestes et altère les performances globales (Guru et al., 2015; Yurko et al., 2010). L'effort mental accru est systématiquement associé à une diminution de la performance routière, tant pour le maintien de la trajectoire que pour la prise de décision en situation critique (Horrey & Wickens, 2006; Strayer & Johnston, 2001).

Parallèlement aux indicateurs subjectifs (effort perçu et charge cognitive perçue), les mesures physiologiques constituent des indices robustes de surcharge mentale. La fréquence cardiaque et la fréquence respiratoire augmentent généralement en situation de stress cognitif, notamment lors de tâches multitâches (Mehler et al., 2010). Des travaux démontrent que des niveaux plus élevés d'activation physiologique correspondent à des performances plus faibles, en raison d'un engagement attentionnel détourné vers la gestion de la surcharge plutôt que vers la tâche de conduite elle-même (Matthews et al., 2015). Ainsi, la physiologie permet de capturer des manifestations non verbales de l'effort mental, particulièrement utiles lorsque les individus sous-estiment ou surestiment leur charge cognitive perçue.

La charge cognitive, qu'elle soit perçue ou physiologique, influence directement la performance en contexte multitâche. Une augmentation de l'effort ou de la charge mentale réduit la disponibilité des ressources attentionnelles nécessaires au contrôle du véhicule, au traitement des signaux environnementaux ou à la rétention d'information. Ces observations s'avèrent particulièrement pertinentes dans un contexte de formation policière, où les conducteurs doivent maîtriser simultanément la conduite, la communication radio, la prise de décision et la surveillance de l'environnement. À la lumière de ces travaux, cette étude formule les hypothèses suivantes :

H2a : Un effort perçu plus élevé est associé à une performance plus faible.

H2b : Une charge cognitive perçue plus élevée est associée à une performance plus faible.

H2c : Un niveau de stress physiologique plus élevé est associé à une performance plus faible.

2.2.3 Multitasking

Dans cette thèse, le multitasking renvoie à la capacité d'exécuter ou d'alterner rapidement deux tâches ou plus qui partagent des ressources attentionnelles communes, par exemple, conduire tout en gérant une communication radio, une navigation, ou la surveillance tactique de l'environnement. Sur le plan théorique, deux grands modèles permettent d'expliquer les coûts liés au multitâche. La Multiple Resource Theory (Wickens, 2008) propose que les interférences entre tâches surviennent lorsque celles-ci mobilisent simultanément les mêmes ressources attentionnelles, qu'il s'agisse de la modalité sensorielle (visuelle, auditive), du type de codage de l'information (spatial, verbal), des étapes de traitement (perception, décision, action) ou encore du système de réponse motrice. Lorsque ces ressources se chevauchent, les performances se détériorent. La seconde approche, dite de la *threaded cognition* (Salvucci & Taatgen, 2008), suggère que l'être humain peut engager plusieurs tâches en parallèle, mais que celles-ci doivent passer successivement par un goulot procédural central, responsable de la coordination des actions. Ainsi, même si plusieurs traitements cognitifs peuvent être initiés en même temps, une seule action peut être sélectionnée et exécutée à la fois, ce qui entraîne des délais ou des conflits lorsque plusieurs tâches sollicitent cette étape simultanément. Ainsi, lorsque deux tâches demandent simultanément des ressources communes (ex. visuel et manuel ou auditif et procédural) la performance se dégrade et la charge mentale augmente. (Salvucci & Taatgen, 2011; Wickens, 2008).

À la lumière de ces résultats, il est théoriquement attendu que les effets du retour haptique dépendent du niveau de charge multitâche imposé par la tâche. Par conséquent, cette étude formule les hypothèses suivantes :

H4: Le niveau de demande multitâche modère l'effet du retour haptique sur les variables de charge.

Au-delà des comportements observables, les études soulignent l'importance de tenir compte des différences individuelles dans la manière dont les personnes gèrent le multitâche. Deux dimensions se démarquent particulièrement : la capacité multitâche, évaluée par des mesures de mémoire de travail comme l'OSPAN, qui reflète l'habileté à maintenir et traiter l'information sous distraction, ainsi que la polychronicité, qui renvoie une capacité subjective

d'une préférence personnelle pour réaliser plusieurs tâches simultanément plutôt que de manière séquentielle. Certaines recherches ont également identifié un profil très atypique d'individus, qualifiés de «supertaskers», capables de maintenir un haut niveau de performance même en situation de double-tâche (Watson & Strayer, 2010). Toutefois, ces cas demeurent extrêmement rares, moins de 3 % de la population testée, et ne remettent pas en cause le principe général selon lequel le multitâche entraîne habituellement une détérioration de la performance (Watson & Strayer, 2010).

Ainsi, il est plausible que les individus plus efficaces en multitâche soient mieux en mesure d'intégrer les signaux haptiques et d'en tirer un bénéfice accru, particulièrement en situation de surcharge. Cette étude émet donc à l'hypothèse suivante :

H5: L'efficacité multitâche modère l'effet du retour haptique sur les variables de charge; les individus plus efficaces en multitâches tirent un bénéfice plus marqué du retour haptique.

Implications du multitasking en conduite

La littérature montre que le multitâche en situation de conduite entraîne une dégradation significative de la performance, même lorsque l'interaction est réalisée en mains libres (Horrey & Wickens, 2006). En effet, des travaux expérimentaux ont montré que les conversations téléphoniques augmentent les temps de réaction, perturbent le maintien latéral et longitudinal du véhicule et altèrent la vigilance du conducteur (Strayer & Johnston, 2001). Ces effets ne s'expliquent pas uniquement par la manipulation physique d'un appareil, mais surtout par un partage des ressources cognitives, comme l'explique la *Multiple Resource Theory* (Wickens, 2008). Cela justifie pourquoi les dispositifs mains libres ne suppriment pas les coûts attentionnels liés à la distraction. D'autres analyses confirment des effets négatifs sur diverses composantes de la conduite : allongement du temps de freinage; diminution de la détection de stimuli critiques; augmentation des écarts latéraux lié au maintien de la trajectoire; fluctuations de la vitesse (Horrey & Wickens, 2006). L'envoi de messages texte constitue une situation encore plus risquée, puisqu'il combine distraction visuelle, manuelle et cognitive, entraînant des déviations de trajectoire, des délais de réponse accrus et davantage de collisions potentielles (Caird et al., 2014).

Ces conclusions sont renforcées par les études réalisées en situation réelle de conduite, notamment la 100-Car Study (Neale et al., 2005). En équipant des véhicules utilisés au quotidien de capteurs et de caméras embarquées, ces recherches ont permis d'observer les comportements des conducteurs en contexte authentique sur route. Les résultats montrent que la réalisation de tâches secondaires, comme composer un numéro, manipuler un écran ou saisir un objet, accroît de manière significative la probabilité d'accidents et de « quasi-accidents ». L'inattention et la mauvaise allocation de l'attention figurent parmi les facteurs les plus fréquemment associés aux événements de sécurité critiques. La théorie et les données convergent : le multitasking en conduite impose des conflits de ressources qui nuisent à la performance. Deux leviers s'en déduisent : réduire la charge extrinsèque des interfaces et des scénarios et repartager l'information sur des modalités sensorielles moins sollicitées, afin de ne pas surcharger davantage les canaux visuel et auditif. La *Multiple Resource Theory* soutient explicitement que, lorsqu'un contexte de surcharge multitâche est identifié, la conception des systèmes doit être ajustée pour tenir compte des limites attentionnelles (Wickens, 2008). Dans ce cadre, l'utilisation de retours haptiques qu'ils soient conçus, comme des signaux d'alerte ou de guidage, constitue une solution prometteuse pour alléger les modalités visuelle et auditive, particulièrement dans des environnements bruyants ou visuellement denses de l'environnement routier.

Ainsi, une interaction triple est théoriquement plausible: le retour haptique pourrait être particulièrement bénéfique pour les personnes les plus efficaces en multitâche, et surtout dans des contextes où la demande multitâche atteint un niveau élevé.

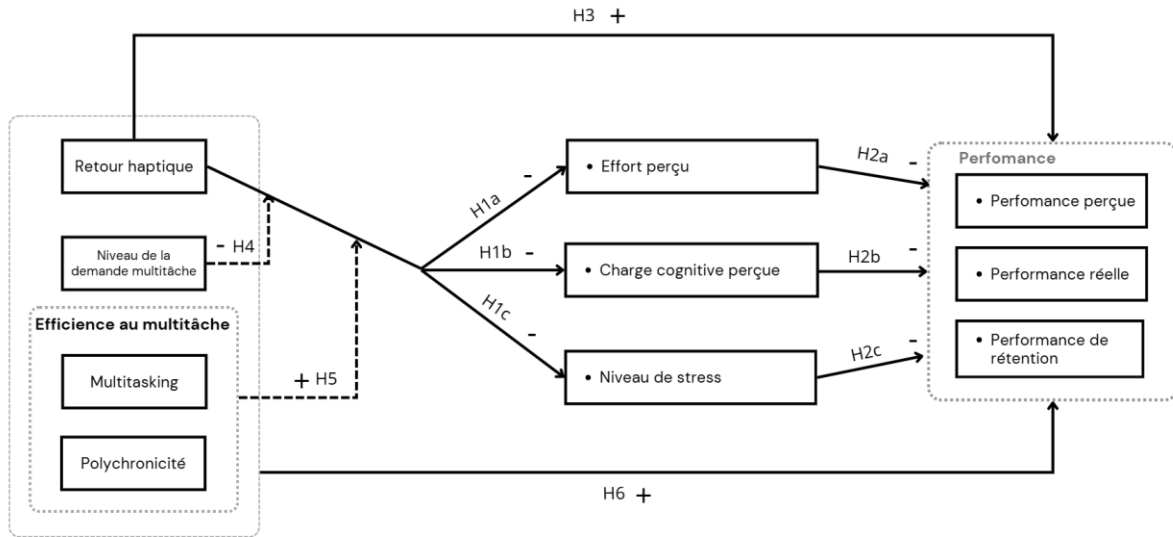
H6: Il existe une interaction triple entre le retour haptique, la demande multitâche et l'efficacité en multitâche, influençant la performance et la charge cognitive.

C'est dans cette perspective que la présente étude, guidée par ses objectifs de recherche, formule les hypothèses suivantes portant sur le rôle modérateur de l'efficacité au multitâche dans la conduite professionnelle des policiers en formation, dans un contexte de simulateur d'apprentissage intégrant le retour haptique (résumé dans le tableau 1). La figure 1 présente le modèle conceptuel proposé, situant les relations anticipées entre le retour haptique, la demande multitâche et les caractéristiques individuelles.

Tableau 1. Liste des hypothèses

Hypothèses
<i>Objectif 1 : Évaluer l'effet direct du retour haptique sur la charge cognitive.</i>
H1a: La présence du retour haptique entraîne une réduction de l'effort perçu.
H1b: La présence du retour haptique entraîne une réduction de la charge cognitive perçue.
H1c: La présence du retour haptique entraîne une réduction du niveau de stress.
<i>Objectif 2 : Vérifier le lien entre surcharge cognitive et performance de conduite et de rétention.</i>
H2a: Plus l'effort perçu est élevé, plus la performance est faible.
H2b: Plus la charge cognitive perçue est élevée, plus la performance est faible.
H2c: Plus le niveau de stress est élevé, plus la performance est faible.
<i>Objectif 3 : Tester l'effet direct du retour haptique sur la performance de conduite.</i>
H3: La présence du retour haptique entraîne une amélioration de la performance.
<i>Objectif 4 : Examiner l'influence du niveau de demande multitâche sur l'effet du retour haptique.</i>
H4 : Le niveau de demande multitâche modère la relation entre le retour haptique et la charge (effort, charge cognitive, stress).
<i>Objectif 5 : Examiner le rôle des différences individuelles dans l'efficacité du retour haptique.</i>
H5 : L'efficacité au multitâche modère la relation entre le retour haptique et les variables de charge. Les individus les plus efficaces retirent un plus grand bénéfice du retour haptique.
H6 : Il existe une interaction triple entre le retour haptique, la demande multitâche et l'efficacité au multitâche sur la performance. Autrement dit, l'effet du retour haptique varie selon la tâche et selon les capacités ou préférences multitâches de l'individu.

Figure 1. Représentation visuelle résumant les hypothèses et le modèle de recherche



2.3 Méthodologie

La méthodologie adoptée dans cette étude reposait sur une expérience contrôlée permettant d'examiner de manière l'effet du retour haptique sur la performance, l'effort perçu, la charge cognitive et le niveau de stress en contexte de conduite policière simulée. Ce choix s'inscrivait dans les objectifs de l'étude, qui visent à isoler l'influence de deux facteurs principaux, la présence du retour haptique et le niveau de demande multitâche de la tâche, tout en tenant compte des différences individuelles en efficacité multitâche. Cette structure permettait d'évaluer à la fois les effets directs, les effets d'interaction et les modérations prévues dans le modèle conceptuel. L'ensemble des manipulations expérimentales, des instruments de mesure et des procédures a été conçu de manière à assurer la réplicabilité, la validité écologique et la qualité des données collectées.

2.3.1 Design expérimental

L'étude reposait sur un plan expérimental mixte inter et intra-sujets. Chaque participant a complété l'ensemble des tâches, mais l'exposition au retour haptique variait entre les individus : certains ont effectué certaines tâches avec retour haptique, tandis que d'autres les ont réalisées sans. L'expérimentation contrôlée a permis de manipuler deux conditions principales, soit la présence ou l'absence de retour haptique et l'ajout d'une charge multitâche plus élevée, afin de mesurer leurs effets sur des indicateurs objectifs, physiologiques et subjectifs. La présence

haptique sur le simulateur était présenté de manière aléatoire sur les sept tâches de l'expérience et était contrebalancé afin de limiter les biais d'apprentissage et de cybermalaise. Cela dit, l'analyse se concentrait principalement sur deux tâches expérimentales présenté respectivement comme suit:

- (i) Une conduite guidée par GPS qui constitue une activité de référence (T1);
- (ii) Une conduite de multitâche impliquant un dispatch policier audio (T2).

Les tâches choisies reflétaient des opérations courantes en patrouille policière, ce qui rapproche l'expérience sur le terrain et renforce la validité écologique. Par ailleurs, une tâche de familiarisation sans retour haptique (NH) au simulateur (T0) a été réalisée avant ces deux conditions. Les tâches subséquentes (T3 à T7) font partie du protocole complet, mais sont présentées uniquement en annexes puisqu'elles ne sont pas au cœur de la présente recherche (voir annexes A et B). La structure factorielle des conditions expérimentales est illustrée à la figure 2, qui présente la combinaison des niveaux de demande multitâche et de la présence ou de l'absence du retour haptique utilisés dans le protocole.

Figure 2. Plan factoriel manipulant le niveau de demande multitâche et le retour haptique

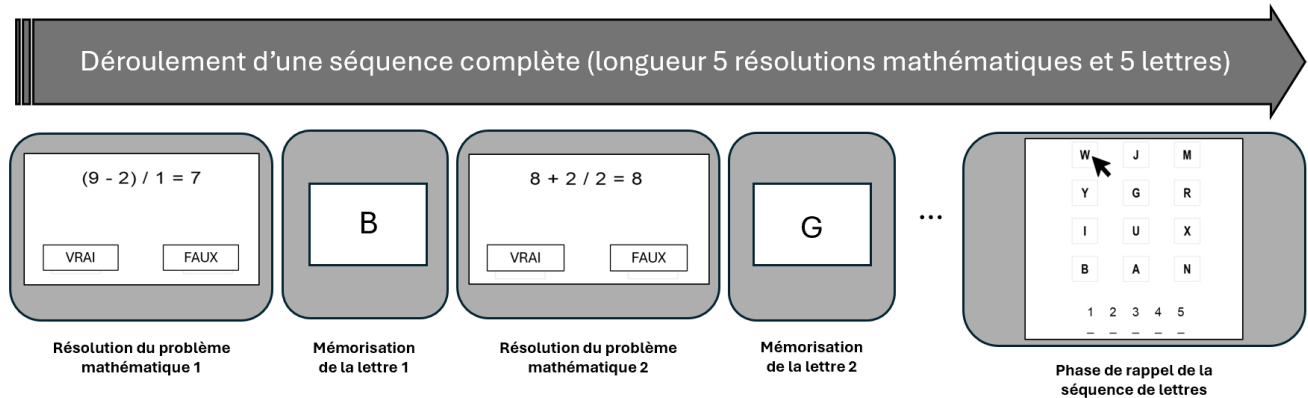
Niveau de demande multitâche	Demande élevée Non haptique	Demande élevée Haptique
	Demande faible Non haptique	Demande faible Haptique
		Retour haptique

2.3.2 Paradigme expérimental

Dans le cadre de cette étude, l'efficacité au multitâche a été conceptualisée à travers deux dimensions complémentaires, soit la capacité objective du multitâche et la préférence subjective au multitâche (polychronicité). Cette capacité objective du multitâche a été mesurée

à l'aide du paradigme *Operation Span task* (OSPAN), un test utilisé en psychologie cognitive pour mesurer la capacité de mémoire de travail et la gestion simultanée de tâches (Turner & Engle, 1989; Unsworth et al., 2005). Le paradigme OSPAN repose sur la réalisation conjointe d'une tâche de résolution d'opérations simples et d'une tâche de mémorisation de lettres. Il permet ainsi d'évaluer la capacité de maintenir activement de l'information tout en accomplissant un traitement cognitif concurrent, ce qui en fait un indicateur objectif fiables des capacités individuelles en multitâche. Les individus présentant des scores OSPAN élevés tendent à mieux hiérarchiser les priorités, à maintenir leur concentration dans des conditions exigeantes et à préserver leur performance lorsqu'ils sont soumis à une charge cognitive accrue. Dans le contexte de la conduite policière simulée, ces capacités sont essentielles, puisqu'elles conditionnent la manière dont un conducteur répartit ses ressources cognitives entre la tâche principale, la conduite, et les tâches secondaires telle que la communication radio. Le choix d'intégrer l'OSPAN dans ce protocole expérimental répondait à deux objectifs. Premièrement, il permettait de quantifier les différences individuelles susceptibles de modérer l'effet du retour haptique dans un environnement multitâche. Deuxièmement, il offrait un cadre théorique pour examiner si les conducteurs ayant une meilleure mémoire de travail, et donc les personnes qui sont bon en multitâche, tirent davantage profit du retour haptique, particulièrement lorsque la demande multitâche de la tâche augmente. En ce sens, le paradigme OSPAN constituait un élément central de l'expérience, puisqu'il permettait d'explorer non seulement des effets moyens, mais également la manière dont le retour haptique pouvait interagir avec des capacités cognitives fondamentales impliquées dans la conduite policière. Une séquence complète d'OSPAN est présentée à la figure 3.

Figure 3.Exemple visuel d'OSPAN



2.3.3 Stimuli expérimentaux

L'étude a été réalisée à l'aide d'un simulateur de conduite reproduisant l'environnement d'un véhicule de police. Les scénarios expérimentaux ont été conçus pour varier selon deux conditions principales: la présence ou l'absence de retour haptique et l'introduction d'un stimulus auditif simulant un dispatch policier, destiné à induire une demande accrue de multitâche. Cette manipulation permettait d'évaluer l'effet du retour haptique et de la charge multitâche demandé durant l'exécution d'une tâche sur la performance de conduite.

Deux tâches expérimentales ont été retenues pour cette étude, précédées d'une période de familiarisation :

- **T0 : Familiarisation (sans haptique, 3 minutes)** : Les participants effectuaient une conduite libre en ville sans retour haptique. Cette phase avait pour objectif de leur permettre de se familiariser avec l'environnement visuel et sonore ainsi qu'avec les commandes du simulateur.
- **T1 : Conduite guidée par GPS (avec ou sans haptique, 3 minutes)** : Cette tâche de référence consistait de conduire en ville, tout en suivant des instructions visuelles et auditives fournies par un système GPS intégré. Elle permettait d'évaluer la performance de conduite dans un contexte relativement contrôlé et à faible demande de multitâche.

- **T2 : Conduite libre avec dispatch policier (avec ou sans haptique, ~2 minutes) :** Dans cette tâche, les participants conduisaient librement en ville tout en recevant un message audio simulant un dispatch policier. Ils devaient mémoriser les informations transmises (lieu, description d'un événement ou d'un individu) afin de répondre à un court questionnaire immédiatement après la tâche. Cette condition visait à créer une situation de multitâche représentative du contexte policier, où le conducteur doit gérer simultanément la conduite et le traitement d'informations verbales.

La tâche à demande multitâche élevée (T2) constituait un élément central de cette expérience puisqu'elle introduisait explicitement une demande de multitâche plus élevée par stimulus auditif, ce qui mobilisait fortement la mémoire de travail et l'attention sélective. Ce type de manipulation est fréquemment utilisé dans les études sur la conduite et la charge cognitive, par exemple à travers des paradigmes de tâches secondaires auditifs ou verbaux (Horrey & Wickens, 2006; Strayer & Johnston, 2001). L'intégration d'un dispatch policier dans le protocole renforçait la validité écologique de l'étude, tout en offrant la possibilité d'examiner de manière expérimentale l'impact d'une demande accrue en multitâche sur la performance de conduite.

2.3.4 Instruments et équipement de laboratoire

L'expérience a été réalisée dans le laboratoire de simulation équipé d'un simulateur de conduite (SN74) qui a été conçu à partir de pièces automobiles réelles afin de reproduire fidèlement l'habitacle d'un véhicule de patrouille. L'installation, présentée dans la figure 4, comprenait un siège d'auto entièrement fonctionnel, une ceinture de sécurité, un volant authentique, ainsi que divers éléments du cockpit du conducteur, permettant une immersion physique et ergonomique proche d'une conduite réelle. L'environnement visuel est généré par un ensemble d'écrans disposés autour du participant : trois écrans plasma de 50 pouces sont positionnés en configuration semi-circulaire devant le conducteur, créant une vue panoramique en « U » qui reproduit le champ visuel avant, incluant le rétroviseur central et les miroirs latéraux. À cette projection frontale s'ajoutait un écran supplémentaire situé derrière le participant, lequel simule la vue arrière du véhicule. Deux écrans de 30 pouces, placés de part et d'autre du cockpit, complétaient l'installation en affichant les angles morts gauche et droit, permettant ainsi une représentation complète du champ visuel d'un véhicule en mouvement.

Cette configuration multi-écrans immersive, combinée à des éléments physiques issus de véritables composantes automobiles, permettait d'exposer les participants à des conditions visuelles et spatiales cohérentes avec celles rencontrées en contexte policier réel. La figure 4 présente la configuration spatiale du simulateur utilisé pour cette expérience.

Le retour haptique était intégré dans le siège du conducteur et fût contrôlé via un poste central permettant d'activer ou de désactiver les mouvements vibrocinétiques. L'ordinateur du poste central permettait entre-autre d'activer les divers scénarios pour les tâches et de générer les rapports de performance des participants à la fin de chaque tâche. Un fichier Excel élaborant l'ordre de randomisation des tâches et de la présence/absence du retour haptique a été créé, considérant que la manipulation des scénarios devait être effectué manuellement sur le poste central. Ce retour haptique reproduisait les mouvements d'un véhicule en action, renforçant l'immersion et l'engagement des participants. De tels dispositifs sont de plus en plus employés dans les recherches en réalité simulée afin d'accroître la fidélité écologique et l'efficacité des environnements (Pietra et al., 2021).

Figure 4. Exemple visuel de la configuration du laboratoire et des simulateurs de conduite



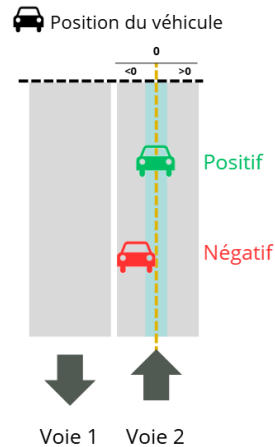
Des données physiologiques ont été enregistrées à l'aide de la veste Hexoskin, un vêtement biométrique qui mesure en continu la fréquence cardiaque et la fréquence respiratoire (Carré Technologies Inc., Montréal, QC, Canada). Cet outil est reconnu pour sa précision et son utilisation croissante dans les études expérimentales en laboratoire comme en contexte de terrain (Villar et al., 2015). Les mesures subjectives (effort perçu, charge mentale perçue, performance perçue, polychronicité) ont été recueillies à travers des questionnaires pré-étude, post-tâche et de fin d'étude, administrés sur tablette iPad via la plateforme Qualtrics (Provo,

UT, États-Unis). L'usage de ce support numérique permettait de standardiser la passation du questionnaire et de garantir une collecte uniforme des données. En complément, un test du paradigme cognitif sur la mémoire de travail (OSPAN) a été administrés sur ordinateur portable en début d'étude afin d'évaluer les différences individuelles pouvant modérer les effets observés. Enfin, le logiciel Capture, développé par le Tech3lab, a été utilisé pour enregistrer en continu la session de chaque participant (Tech3lab, QC, Canada). Cette captation audiovisuelle offrait une trace complète du déroulement de chaque session, facilitait l'analyse des comportements afin de renforcer la validité des données et garantissait un suivi rigoureux du protocole expérimental.

2.3.5 Mesures

Les mesures recueillies dans cette étude se répartissent en indicateurs objectifs, subjectifs et physiologiques. La performance de conduite a d'abord été évaluée à partir des données objectives issues du simulateur. Trois indicateurs principaux ont été retenus : la vitesse moyenne du véhicule (*speed*), le maintien de la trajectoire, mesuré par la distance au centre de la voie (*distance to center of lane*; présentée dans la figure 5), ainsi que la stabilité latérale, mesurée par la direction du volant (*steering*). L'analyse de ces variables s'est concentrée sur la comparaison entre les deux tâches expérimentales (T1 et T2). En complément, durant la tâche à forte demande multitâche (T2), une mesure de performance de rétention a été intégrée afin d'évaluer la capacité des participants à retenir et organiser l'information transmise par le dispatch policier. Cette mesure reposait sur un quiz composé de deux dimensions distinctes : d'une part, la rétention du contenu informationnel du dispatch et, d'autre part, la rétention séquentielle permettant de reconstituer l'ordre narratif des événements mentionnés dans l'audio.

Figure 5. Illustration de la distance du centre de la voie



Les données physiologiques ont été enregistrées à l'aide de la veste Hexoskin (Carré Technologies Inc., Montréal, QC, Canada), qui a permis de capter le rythme respiratoire et la fréquence cardiaque (bpm) des participants. Ces indicateurs sont couramment utilisés comme indices d'activation physiologique et de charge mentale, des augmentations de la fréquence cardiaque et du rythme respiratoire étant généralement associées à une augmentation des exigences cognitives et du niveau d'activation (Grassmann et al., 2016; Hidalgo-Muñoz et al., 2019).

Les mesures subjectives ont été recueillies grâce à des questionnaires administrés après chaque tâche et à la fin de la session. La charge de travail et l'effort perçu ont été évalués au moyen du NASA-TLX, un outil largement validé qui comprend six dimensions : demande mentale, demande physique, demande temporelle, performance, effort et frustration (Hart & Staveland, 1988). La performance perçue a également été mesurée à l'aide de trois items d'auto-évaluation sur une échelle de Likert à 7 points (Nadj et al., 2023).

Enfin, deux mesures individuelles ont été intégrées afin d'examiner le rôle des différences cognitives et comportementales. La mémoire de travail a été mesurée à l'aide du paradigme *Operation Span Task* (OSPAN), qui évalue la capacité à maintenir des informations pertinentes tout en accomplissant une tâche concurrente (Conway et al., 2005; Turner & Engle, 1989). Comme le souligne Conway et al. (2005), un haut score à l'OSPAN est généralement associé à de meilleures performances en contexte multitâche (Conway et al., 2005). La polychronicité, définie comme la préférence individuelle pour gérer plusieurs tâches en parallèle, a été mesurée

par le *Polychronic Attitude Index* (PAI) qui permet de distinguer les individus favorisant un mode multitâche de ceux privilégiant un mode séquentiel (Bluedorn et al., 1999). Le tableau 2 présente un résumé des mesures de l'étude. Un tableau complet des mesures utilisées dans cette étude est présenté dans la section Annexes (voir annexe C).

Tableau 2. Résumé des mesures utilisées pour l'étude

Variable	Mesure	Exemples d'items	Unité
Charge cognitive	NASA TLX	1. Dans quelle mesure la tâche a-t-elle été mentalement exigeante ? 2. Dans quelle mesure la tâche a-t-elle été physiquement exigeante ? 3. A quel point vous êtes-vous senti(e) pressé(e) durant la tâche ?	Curseur de pourcentage : 0 = Bas 100 = Élevé
Effort perçu	NASA TLX	À quel point avez-vous dû fournir des efforts pour atteindre votre niveau de performance ?	Curseur de pourcentage : 0 = Bas 100 = Élevé
Polychronicité	<i>Polychronic Attitude Index</i> (PAI)	1. J'aime accomplir plusieurs tâches en même temps. 2. Je préfère travailler sur plusieurs projets simultanément plutôt que de me concentrer sur un seul. 3. Lorsque je travaille sur une tâche, j'aime m'interrompre pour en accomplir d'autres. 4. Je trouve stimulant de jongler entre plusieurs tâches en même temps.	Échelle de Likert 1 (Pas du tout d'accord) à 7 (Tout à fait d'accord)
Performance perçue	Performance perçue	1. Comment évalueriez-vous votre performance dans la tâche sur le simulateur ? 2. Si vous deviez noter votre performance dans la tâche sur le simulateur, quelle note vous donneriez-vous ? 3. Comparé(e) aux autres, comment pensez-vous avoir accompli cette tâche ?	Échelle de Likert 1 (Extrêmement mauvaise) à 7 (Extrêmement bonne) Échelle de Likert 1 (Performance très faible à la moyenne) à 7 (Performance très supérieure à la moyenne)
Performance sur simulateur	<i>Speed</i> <i>Steering</i> <i>Distance To Center of lane</i>	Mesures et métriques de performance analysées: -Vitesse -Contrôle du volant -Distance du centre de la voie	-
Âge	Âge	Quel âge avez-vous?	1-100
Profil d'étude	Profile	Vous êtes étudiant(e) en techniques policières. Dans quelle année êtes-vous ?	1ère année 2e année 3e année AEC
Genre	Genre	À quel genre vous identifiez-vous?	Homme Femme Non-binaire Autre
Expérience en simulation	Expérience sur simulateur	Avez-vous déjà utilisé un simulateur de conduite ?	Non. Si oui, lequel ? (Réponse libre.)

Expérience en conduite	Expérience de conduite	1. Depuis combien de temps conduisez-vous régulièrement ? 2. Combien d'heures par semaine passez-vous à conduire en moyenne ? 3. Dans quelle mesure vous considérez-vous comme un conducteur expérimenté ?	Question 1 et 2 : Réponse ouverte ou intervalle de temps (ex. moins d'un an, 1-3 ans, 3-5 ans, etc.) Question 3 : Échelle de Likert de 1 (Très inexpérimenté) à 7 (Très expérimenté)
------------------------	------------------------	--	---

2.3.6 Participants

Le projet a été réalisé à l'aide d'un établissement d'enseignement supérieur au Québec en possession d'un simulateur de conduite professionnelle doté d'un système de retour haptique et avec la participation d'étudiants en formation policière au sein de cette même institution. L'échantillon de cette recherche était composé de vingt-cinq étudiants inscrits au programme collégial de Techniques policières de 1^{ère}, 2^e et 3^e année, ainsi que dans le programme de formation continue (AEC). Les participants étaient composés de 12 femmes et 13 hommes et étaient âgés de 18 à 31 ans (moyenne=21 ans; écart-type = 3,7). La répartition détaillée des participants selon le genre et l'année d'étude est présentée au tableau 3, permettant d'illustrer la diversité des profils académiques au sein de l'échantillon.

Tableau 3. Répartition des profils d'étude par genre

Genre	1 ^{ère} année	2 ^e année	3 ^e année	AEC
Femme	8	-	4	-
Homme	4	4	4	1
Total	12	4	8	1

AEC : Attestation d'études collégiales

Le choix de cette population est directement lié au contexte applicatif de l'étude, puisque ces participants représentent de futurs agents appelés à exercer la conduite en situation multitâche dans leur pratique professionnelle. Au cours de l'année scolaire de 2023-2024, on comptait 2998 étudiants inscrits en Technique policière (Enseignement Supérieur du Québec, 2023). Seul, un certain nombre sont sélectionnés pour passer à l'École nationale de police du Québec, soit, un total de 972 futurs policiers par année (*ENPQ*, s. d.). Par ailleurs, tous les participants détenaient un permis de conduire valide et avaient une expérience minimale de conduite automobile. La participation à l'étude était volontaire et chaque étudiant a signé un formulaire

de consentement éclairé approuvé par les comités d'éthique de HEC Montréal (Projet #2025-6406).

La sélection des participants reposait sur un ensemble de critères d'inclusion et d'exclusion définis afin d'assurer la pertinence du recrutement et la validité interne de l'étude. Les participants admissibles devaient être âgés de plus de 18 ans et être inscrits dans un programme de Techniques policières, soit dans le cadre d'un DEC ou d'une AEC, ce qui garantit un niveau minimal de familiarité avec les contextes d'intervention policière et les exigences propres à la conduite professionnelle. Ils devaient également détenir un permis de conduire valide et être en mesure de comprendre et de s'exprimer en français à un niveau avancé, afin de pouvoir suivre les consignes expérimentales et compléter les mesures subjectives. Certains critères d'exclusion ont également été appliqués afin d'assurer la sécurité des participants et la qualité des données recueillies. Les individus présentant une incompatibilité avec les outils physiologiques utilisés, notamment les dispositifs de mesure intégrés à la veste Hexoskin, étaient exclus. De même, toute personne souffrant d'allergies cutanées ou de sensibilités particulières susceptibles d'être aggravées par le port de cette veste ne pouvait pas participer. L'ensemble de ces critères visait à garantir un échantillon homogène et en mesure de compléter l'ensemble des tâches expérimentales sans risque pour leur santé ou leur confort.

Au total, 26 participants ont été recrutés. Après une vérification de la qualité des données, un cas a été exclu, ce qui a conduit à un échantillon final de $N=25$. À la fin de l'étude, une compensation monétaire de 50\$ leur était envoyé par virement Interac pour leur participation.

2.3.7 Procédure

La durée totale d'une session expérimentale était d'environ 90 minutes (voir l'annexe B pour le déroulement complet de l'expérience). À leur arrivée au laboratoire, les participants étaient accueillis et informés du déroulement de l'expérience. Après avoir signé le formulaire de consentement, ils revêtaient la veste Hexoskin, permettant l'enregistrement continu des données physiologiques (rythme cardiaque, fréquence respiratoire, variabilité). Pendant cette étape, la tâche du paradigme cognitif (OSPAN) était lancé sur l'ordinateur portable et était ensuite administrés. Le déroulement du test comprend plusieurs étapes successives permettant aux participants de se familiariser avec les instructions de la tâche avant de réaliser la version

complète. L'OSPAN consistait à mémoriser une séquence de lettres tout en résolvant, entre chaque lettre, une opération mathématique simple. À chaque essai, une équation apparaissait à l'écran, par exemple « $3 \times 2 + 1 = ?$ », et le participant devait indiquer si la réponse proposée était correcte ou non. Immédiatement après cette opération, une lettre à mémoriser était présentée. Le participant doit conserver mentalement l'ordre exact des lettres jusqu'à la fin de la séquence, moment où une grille lui est présentée afin de sélectionner les lettres mémorisées dans le bon ordre. Avant d'entamer le test complet, plusieurs phases d'entraînement étaient proposées. Une première pratique portait uniquement sur la mémorisation de lettres, au sein de séquences courtes de quatre items. Une seconde pratique portait exclusivement sur les opérations mathématiques, comprenant cinq équations permettant au participant de se familiariser avec le rythme de réponse attendu. Une troisième phase combinait cette fois les deux types de stimuli. Les participants réalisaient trois séquences complètes où chaque lettre à mémoriser était précédée d'une opération mathématique. Chaque séquence comportait cinq lettres présentées successivement, chacune apparaissant immédiatement après la résolution d'une équation. Aucune lettre n'était répétée plus d'une fois au sein d'une même séquence. Les participants devaient donc alterner continuellement entre deux types de traitement cognitif: la résolution d'opérations mathématiques (tâche de traitement) et la mémorisation ordonnée d'items verbaux (tâche de mémorisation). Ensuite, les participants complétaient un court questionnaire sociodémographique avant d'être installés au simulateur de conduite. La modératrice expliquait alors les commandes, ajustait le siège et configurait la condition haptique et les scénarios de tâche selon l'assignation aléatoire. Une brève tâche de familiarisation (T0) était d'abord réalisée sans retour haptique afin de réduire les biais liés à l'adaptation au simulateur. La session se poursuivait par deux tâches de référence présentées dans un ordre fixe : la conduite guidée par GPS (T1 : à faible demande de capacités multitâches) et la tâche multitâche de dispatch policier (T2 : à haute demande de capacités multitâches). Ces tâches initiales permettaient d'établir une base commune pour tous les participants et d'assurer une standardisation des conditions expérimentales. Ensuite, les participants réalisaient une série de sept scénarios supplémentaires de conduite (T3 à T7), dans lesquels la présence ou l'absence du retour haptique était manipulée de manière aléatoire (en annexes). Des pauses étaient offertes au besoin entre les tâches afin de maintenir le confort et l'attention des participants. À l'issue de chaque fin de tâche, un questionnaire post-tâche était

administré afin de recueillir les impressions subjectives des participants concernant la charge cognitive perçue, l'effort perçu et la performance perçue. Enfin, à la fin de la session, les participants complétaient un questionnaire global de fin d'étude, recevaient leur compensation et étaient remerciés pour leur participation. La figure 6 synthétise visuellement l'ensemble du protocole expérimental suivi par les participants pour cette étude.

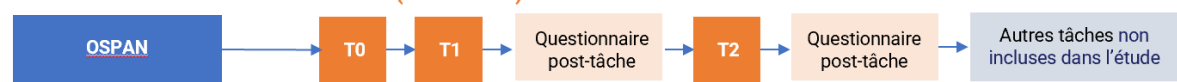
Figure 6. Déroulement complet de la procédure expérimentale

ACCUEIL ET INSTALLATION (15 min.)



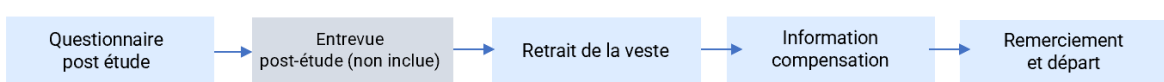
TEST UTILISATEUR (60 min.)

BLOC A (max 15 min)



BLOC B (max 45 min)

ENTREVUE ET CONCLUSION (15 min.)



2.3.8 Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel SAS, en utilisant des modèles adaptés à la nature des données recueillies (SAS Institute Inc., NC, États-Unis). Comme chaque participant a réalisé toutes les tâches de conduite, dans des conditions haptiques et non haptiques, les données comportaient des mesures répétées pour un même individu. Pour tenir compte de cette dépendance entre les observations, nous avons utilisé des modèles linéaires mixtes. Le seuil de signification statistique a été fixé à $\alpha = 0,05$, et les valeurs p situées entre 0,05 et 0,10 sont rapportées comme marginales lorsqu'elles apportent un éclairage pertinent. Les analyses ont été structurées en fonction du plan expérimental. Pour évaluer l'effet du retour haptique et de la demande multitâche, chaque variable dépendante (effort perçu, charge cognitive perçue, fréquence cardiaque, respiration, vitesse, stabilité latérale, distance au centre de la voie, performance) a été modélisée en intégrant comme facteurs fixes la présence ou

l'absence du retour haptique, le type de tâche (T1 : conduite à faible demande en multitâche; T2 : conduite à forte demande en multitâche), ainsi que leur interaction. Pour déterminer si les différences individuelles influençaient les effets du retour haptique ou de la demande multitâche, les scores au test OSPAN (capacité de mémoire de travail) et la polychronicité (préférence déclarée pour le multitâche) ont été intégrés comme modérateurs dans les modèles. Ces analyses visaient à identifier dans quelle mesure les variations inter-individuelles pouvaient moduler les réponses cognitives, physiologiques ou comportementales observées. L'ensemble de ces modèles permettait ainsi d'évaluer de façon rigoureuse les effets principaux, les interactions et les modérations tout en considérant la variabilité inter-individuelle inhérente au plan expérimental.

2.4 Résultats

2.4.1 Statistiques descriptives

Afin de situer les analyses inférentielles, le tableau 4 présente les statistiques descriptives (moyennes et écarts-types) des principales variables en fonction de la présence ou de l'absence du retour haptique (H/NH) et selon les deux tâches expérimentales (T1: faible demande multitâche et T2: forte demande multitâche). Ces résultats descriptifs offrent un premier aperçu des tendances générales, notamment concernant l'effort perçu, la charge cognitive, la performance perçue, les indicateurs physiologiques de stress (fréquence cardiaque et respiration), ainsi que les mesures objectives de performance de conduite (vitesse, contrôle du volant, distance au centre de la voie). Ils permettent de comparer les conditions expérimentales et de dégager des différences initiales avant l'examen statistique plus approfondi des hypothèses.

Tableau 4. Statistiques descriptives de la présence ou l'absence du retour haptique par tâche

	T1				T2			
	Mean		SD		Mean		SD	
Variables	H (n=13)	NH (n=12)	H (n=13)	NH (n=12)	H (n=12)	NH (n=13)	H (n=12)	NH (n=13)
1.Effort perçu	49.15	42.08	26.41	27.68	74.83	73.38	21.48	19.11
2.Charge cognitive perçue	35.54	28.11	21.14	19.24	48.92	53.05	17.78	11.20

3.Performance perçue	4.41	4.58	1.46	2.02	4.36	4.95	1.27	0.95
4.Niveau de stress (Fréquence cardiaque)	8.58	8.74	6.18	5.57	9.61	7.90	7.41	7.76
5.Niveau de stress(respiration)	3.44	2.57	1.64	1.28	2.67	2.66	1.48	1.36
6.Vitesse	6.66	6.61	0.84	0.01	9.26	9.71	3.03	3.23
7.Contrôle du volant(steering)	0.05	0.06	0.01	0.07	0.02	0.03	0.01	0.02
8.Distance du centre de la voie	0.09	0.08	0.06	5.57	0.08	0.07	0.07	0.04
9.Mémoire de travail	-	-	-	-	5.58	6.00	1.56	1.08
10.Mémoire séquentielle	-	-	-	-	2.75	2.92	1.66	1.55

*Note : H/NH : présence vs absence du retour haptique; T1 = condition à faible demande multitâche (navigation GPS)
T2 = condition à forte demande multitâche (conduite libre + mémorisation du stimuli auditif)*

2.4.2 Les tests et la validation des hypothèses

H1a : Effet retour haptique sur l'effort perçu

L'hypothèse H1a stipulait que la présence du retour haptique entraîne une réduction de l'effort perçu par les participants. Pour tester cette hypothèse, nous avons comparé l'effort perçu dans les conditions avec retour haptique et sans retour haptique, toutes tâches confondues. L'analyse de l'effet principal du retour haptique révèle une absence d'effet significatif sur l'effort perçu ($\beta = 3.12$, $t(24) = 0.4$, $p = 0.655$). Ces résultats ne permettent donc pas de confirmer une réduction de l'effort perçu attribuable à la condition haptique. Par conséquent, l'hypothèse H1a n'est pas supportée.

H1b : Effet du retour haptique sur la charge cognitive perçue

L'hypothèse H1b postulait que la présence du retour haptique entraîne une réduction de la charge cognitive perçue par les participants. Pour tester cette hypothèse, nous avons comparé la charge cognitive rapportée dans les conditions avec retour haptique et sans retour haptique, indépendamment du type de tâche. L'analyse de l'effet principal du retour haptique n'indique

pas d'effet significatif ($\beta = 0.88$, $t(24) = 0.16$, $p = 0.563$). Autrement dit, un effet entre la présence du retour haptique et la perception de la charge mentale associée à la conduite simulée n'a pas été détecté. Aucune différence n'a été observée entre les deux conditions. Par conséquent, l'hypothèse H1b n'est pas supportée.

H1c : Effet du retour haptique sur le niveau de stress

L'hypothèse H1c stipulait que la présence du retour haptique entraîne une diminution du niveau de stress. Dans cette étude, le niveau de stress a été mesuré à partir de deux indicateurs physiologiques : la fréquence cardiaque (bpm) et le rythme respiratoire (*breath rate*). Les analyses réalisées n'ont révélé aucun effet significatif du retour haptique sur la fréquence cardiaque ($\beta = 0.76$, $t(23) = 1.20$, $p = 0.121$). En revanche, une tendance marginalement significative a été observée pour la fréquence respiratoire ($\beta = 0.47$, $t(23) = 1.53$, $p = 0.070$). Ces résultats indiquent qu'en moyenne, l'activation physiologique tend à être plus élevée en condition haptique, bien que l'effet demeure faible et non statistiquement robuste. Ainsi, l'hypothèse H1c n'est pas supportée.

H2a : Effet de l'effort perçu sur la performance

L'hypothèse H2a postulait qu'un effort perçu plus élevé serait associé à une performance plus faible. Les analyses réalisées à l'aide de modèles mixtes montrent que cette relation n'est pas uniforme selon les indicateurs de performance considérés. Concernant la performance perçue, les résultats vont dans la direction attendue, mais ne permettent pas de confirmer cette relation de manière significative ($\beta = -0.012$, $t(47.53) = -1.49$, $p = 0.071$). Une tendance marginale apparaît donc en faveur d'une association entre un effort plus élevé et une performance perçue plus faible. Pour la vitesse moyenne, l'effet de l'effort perçu est significatif ($\beta = 0.041$, $t(46) = 3.18$, $p = 0.001$). Cette relation positive indique qu'une augmentation de l'effort perçu est associée à une vitesse plus élevée, dans le sens de ce qui était anticipé. Du côté du contrôle du volant (*steering*), les résultats soutiennent l'hypothèse initiale : un effort perçu plus élevé est significativement lié à une dégradation de la stabilité directionnelle ($\beta = -0.0004$, $t(46) = -4.3$, $p < 0.001$). Ce résultat confirme que l'augmentation de l'effort s'accompagne d'une perte de précision dans la manipulation du volant, traduisant une surcharge attentionnelle. Par ailleurs, la distance au centre de la voie ne montre pas de relation significative avec l'effort perçu

($\beta = 0.0002$, $t(34.8) = 0.61$, $p = 0.274$), indiquant qu'aucune association claire n'a pu être établie pour cet indicateur de stabilité latérale. Enfin, pour ce qui est de la performance de rétention durant la tâche à haut niveau de demande multitâche, aucune association significative n'a été observée entre l'effort perçu et la mémoire de travail ($\beta = -0.002$, $t(23) = -0.13$, $p = 0.450$), ni entre l'effort perçu et la mémoire séquentielle ($\beta = 0.025$, $t(23) = 1.56$, $p = 0.124$).

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que l'effort perçu influence certains aspects du comportement de conduite, mais pas de manière uniforme. L'effet est marginalement significatif pour la performance perçue, positif et significatif pour la vitesse, négatif et significatif pour le contrôle du volant, et non significatif pour la stabilité latérale. Ainsi, l'hypothèse H2a est partiellement supportée : elle est confirmée pour le contrôle du volant, ainsi que pour la vitesse, et non supportée pour la performance perçue, la performance de rétention et la distance au centre de la voie.

H2b : Effet de la charge cognitive perçue sur la performance

L'hypothèse H2b posait qu'une charge cognitive perçue plus élevée serait associée à une performance plus faible. Les résultats montrent toutefois un portrait nuancé selon les indicateurs de performance considérés. Du côté de la performance perçue, une relation négative et significative, est observée ($\beta = -0.02$, $t(47.99) = -2.12$, $p = 0.019$). Ce résultat soutient l'hypothèse, indiquant qu'une charge cognitive plus élevée tend à être liée à une diminution de la performance telle que rapportée par les participants. Autrement dit, lorsque les conducteurs perçoivent une tâche comme plus exigeante mentalement, ils évaluent aussi leur performance comme moins bonne. Ensuite, concernant la vitesse, un effet significatif est relevé ($\beta = 0.05$, $t(46) = 2.91$, $p = 0.003$). Dans le contexte de la conduite simulée, cette augmentation de vitesse ne traduit pas une amélioration de la performance, mais plutôt une perte de régulation comportementale. Ainsi, un effort cognitif élevé semble amener les conducteurs à adopter un rythme de conduite plus rapide, quitte à réduire leur marge de sécurité, ce qui correspond à une baisse globale de la performance de conduite. Cette relation positive confirme donc l'hypothèse initiale. Les résultats concernant le contrôle du volant (*steering*) soutiennent aussi directement l'hypothèse : un effet significatif et négatif est observé ($\beta = -0.0004$, $t(46) = -3.50$, $p = 0.001$). Cela indique qu'une charge cognitive accrue dégrade la

stabilité directionnelle, traduisant une perte de précision dans le contrôle du volant lorsque les ressources attentionnelles sont surchargées. En revanche, la distance au centre de la voie ne montre pas de relation significative avec la charge cognitive ($\beta = 0.0004$, $t(36.7) = 0.88$, $p = 0.806$). Pour ce qui est de la performance de rétention, aucune association significative n'a été observée entre la charge cognitive et la rétention d'information. Les résultats concernant la mémoire de travail ($\beta = -0.01$, $t(23) = -0.51$, $p = 0.308$), ainsi que pour la mémoire séquentielle ($\beta = 0.009$, $t(23) = 0.39$, $p = 0.650$), les liens demeurent non significatifs. Ces résultats laissent penser que la charge cognitive perçue n'a pas compromis la capacité des participants à encoder et à restituer les informations transmises.

En somme, l'hypothèse H2b est partiellement supportée : elle est confirmée pour la performance perçue, la vitesse et le contrôle du volant, et non supportée pour la distance au centre de la voie et la performance de rétention. Ces résultats illustrent l'hétérogénéité des effets de la charge cognitive selon les dimensions de la performance et soulignent que certaines composantes comportementales peuvent être maintenues, voire amplifiées, en contexte de forte demande mentale, possiblement au détriment d'autres aspects du contrôle et de la précision du véhicule.

H2c : Effet du niveau de stress sur la performance

L'hypothèse H2c postulait qu'un niveau de stress plus élevé entraînerait une performance plus faible. Rappelons que dans cette étude, le stress a été évalué à l'aide de deux mesures physiologiques captés par la veste Hexoskin : la fréquence respiratoire (*breath rate*) et la fréquence cardiaque (bpm).

H2c : Effet du niveau de stress mesuré par la respiration

Les résultats indiquent qu'aucune relation significative n'a été observée entre la fréquence respiratoire et les mesures de performance de conduite. En effet, les estimations montrent des effets faibles et non significatifs pour la performance perçue ($\beta = 0.07$, $t(46) = 0.51$, $p = 0.693$), la vitesse ($\beta = -0.008$, $t(44) = -0.03$, $p = 0.511$), le contrôle du volant (*steering*) ($\beta = -0.0008$, $t(44) = -0.42$, $p = 0.340$), et la distance au centre de la voie ($\beta = 0.001$, $t(43.86) = 0.21$, $p = 0.584$). Du côté de la performance de rétention, les résultats sont similaires: aucune relation

significative n'a été observée entre la fréquence respiratoire et la mémoire de travail ($\beta = 0.106$, $t(22) = 0.51$, $p = 0.694$), ni avec la mémoire séquentielle ($\beta = 0.219$, $t(22) = 0.92$, $p = 0.371$). Bien que les coefficients soient positifs, leurs valeurs ne permettent pas d'inférer l'existence d'une relation, même faible. Ainsi, cet effet ne permet pas de confirmer une relation robuste entre la respiration, considérée ici comme indicateur physiologique de stress, et la performance.

H2c : Effet du niveau de stress mesuré par la fréquence cardiaque

Lorsqu'on considère la fréquence cardiaque comme indicateur de stress, aucune relation significative, n'a été détectée pour les différentes mesures de performance de conduite. Les résultats montrent une relation faible et marginalement supportée entre le niveau de stress et la performance perçue ($\beta = -0.04$, $t(46) = -1.38$, $p = 0.087$). Aucun résultat significatif n'est démontré par la vitesse ($\beta = -0.05$, $t(44) = -0.75$, $p = 0.229$), ni le contrôle du volant ($\beta = -0.0001$, $t(44) = -0.28$, $p = 0.392$), ni la distance au centre de la voie ($\beta = -0.0005$, $t(29.07) = -0.28$, $p = 0.390$). Pour la performance de rétention, aucune relation significative n'a non plus été observée entre la fréquence cardiaque et la mémoire de travail ($\beta = -0.0177$, $t(22) = -0.46$, $p = 0.324$) ou la mémoire séquentielle ($\beta = -0.0436$, $t(22) = -0.98$, $p = 0.168$). Ces résultats confirment que les variations physiologiques de la fréquence cardiaque ne sont pas liées à des fluctuations significatives de la performance de rétention.

H2c : Interprétation générale de l'effet du niveau de stress sur la performance

Dans l'ensemble, les analyses ne révèlent pas de lien statistiquement significatif entre les marqueurs physiologiques du stress et la performance de conduite ou de rétention. Bien qu'un effet marginal ait été observé entre la fréquence cardiaque et la performance perçue, la direction négative de cette relation va dans le sens de l'hypothèse initiale selon laquelle un niveau de stress plus élevé serait associé à une performance moindre. Toutefois, cet effet demeure non significatif et ne permet donc pas de confirmer statistiquement l'hypothèse. Bien que cette relation ne soit pas statistiquement significative, elle reflète une dynamique cohérente avec la littérature sur la charge mentale et le stress en conduite (Vienne et al., 2011), selon laquelle une activation physiologique accrue tend à altérer la perception de contrôle et

d'efficacité. Ainsi, l'hypothèse H2c n'est pas globalement supportée, bien qu'une tendance marginale observée entre la fréquence cardiaque et la performance perçue.

H2 : Effet sur la performance de rétention

La performance de rétention a été évaluée à l'issue de la tâche à forte demande multitâche (T2) à l'aide d'un questionnaire comportant deux dimensions : la mémoire de travail et la mémoire séquentielle. La mémoire de travail mesurait la capacité à rappeler des informations détaillées sur le scénario (score sur 7 points), tandis que la mémoire séquentielle portait sur la capacité à mémoriser l'ordre des événements (score sur 4 points). En moyenne, les participants ont obtenu un score de 5.80 ($SD= 1.32$) pour la mémoire de travail et 2.48 ($SD= 1.57$) pour la mémoire séquentielle.

Les analyses statistiques ne révèlent aucun effet significatif des variables liées à la charge cognitive, de l'effort perçu ou des mesures physiologiques sur la performance de rétention. Plus précisément, pour la mémoire de travail, aucune relation significative n'a été observée avec l'effort perçu ($\beta= -0.002$, $t(23)= -0.13$, $p= 0.9$), la charge cognitive perçue ($\beta= -0.010$, $t(23)= -0.51$, $p= 0.617$), la fréquence respiratoire ($\beta= 0.106$, $t(22)= 0.51$, $p= 0.613$) ou la fréquence cardiaque ($\beta= -0.0177$, $t(22)= -0.46$, $p= 0.648$). De même, pour la mémoire séquentielle, aucun effet significatif n'a été observé de l'effort perçu ($\beta= 0.025$, $t(23)= 1.59$, $p= 0.125$), de la charge cognitive perçue ($\beta= 0.009$, $t(23)= 0.39$, $p= 0.701$), de la fréquence respiratoire ($\beta= 0.219$, $t(22)= 0.92$, $p= 0.370$) ou de la fréquence cardiaque ($\beta= -0.0436$, $t(22)= -0.98$, $p= 0.336$). Dans le cadre de ce scénario, les niveaux de charge subjective ou physiologique mesurés n'ont pas influencé la capacité de rétention des apprenants. Ainsi, même si certaines variables affectent la performance de conduite ou l'engagement cognitif, elles ne semblent pas moduler la performance de rétention évaluée immédiatement après la tâche.

H3 : Effet du retour haptique sur la performance

L'hypothèse H3 postulait que la présence du retour haptique entraînerait une amélioration de la performance globale de conduite. Les analyses effectuées n'ont toutefois révélé aucun effet significatif du retour haptique sur la performance perçue ($\beta= -0.39$, $t(24)= -0.99$, $p= 0.833$), ni

sur les indicateurs de performance objective tels que la vitesse ($\beta = -0.44$, $t(46) = -0.99$, $p = 0.713$), le contrôle du volant ($\beta = -0.39$, $t(24) = -0.99$, $p = 0.666$), ou la distance du centre de la voie ($\beta = 0.003$, $t(23) = 0.29$, $p = 0.386$). Ainsi, cette hypothèse n'est pas supportée.

Effet du retour haptique sur la performance de rétention

L'effet du retour haptique sur la performance de rétention a également été évalué. Les résultats ne montrent pas d'effet significatif de la condition haptique sur les scores de mémoire de travail ni sur la mémoire séquentielle. Pour la mémoire de travail, le retour haptique n'a pas amélioré les performances de rappel ($\beta = -0.42$, $t(23) = -0.78$, $p = 0.443$). De même, aucun effet significatif n'a été observé sur la mémoire séquentielle ($\beta = -0.17$, $t(23) = -0.27$, $p = 0.790$). Dans ce contexte expérimental, la présence du retour haptique pendant la tâche à forte demande multitâche n'a pas eu d'impact mesurable sur la capacité de rétention des participants. L'haptique ne semble donc pas soutenir directement la mémorisation des informations opérationnelles à court terme, malgré son potentiel pour réduire la surcharge attentionnelle dans d'autres dimensions de la performance de conduite.

H4 : Effet modérateur de la demande multitâche sur la relation du retour haptique sur les variables de charge (effort perçu, charge cognitive perçue et niveau de stress)

L'hypothèse H4 proposait que le niveau de demande multitâche modère la relation entre le retour haptique et les variables suivantes : l'effort perçu, la charge cognitive perçue et le niveau de stress. Autrement dit, l'effet du retour haptique sur ces variables devait varier selon que la tâche sollicitait davantage de ressources attentionnelles liées au multitâche. Les analyses n'ont révélé aucun effet significatif de cette interaction sur les mesures évaluées. Pour l'effort perçu, le modèle ($\beta = 5.62$, $t(23) = 0.35$, $p = 0.636$) ne montre aucune modulation notable de l'effet du retour haptique observée entre la tâche à faible demande multitâche (T1) et celle à forte demande multitâche (T2). De même, pour la charge cognitive perçue, les résultats ($\beta = 11.56$, $t(23) = 0.98$ et $p = 0.831$) indiquent l'absence de modulation significative selon le niveau de demande de multitâche. Enfin, en ce qui concerne les indicateurs physiologiques du stress, aucune interaction significative n'a non plus été observée, ni pour la fréquence respiratoire ($\beta = 0.86$, $t(22) = 0.84$, $p = 0.795$), ni pour la fréquence cardiaque ($\beta = -1.86$, $t(22) = -0.34$, $p =$

0.367). Ainsi, l'hypothèse H4 n'est pas supportée. Le niveau de complexité multitâche ne semble pas avoir modulé l'effet du retour haptique sur ces variables.

H5 : Effet modérateur du comportement de multitasking sur la relation du retour haptique sur les variables de charge (effort perçu, charge cognitive perçue et niveau de stress)

L'hypothèse H5 proposait que l'efficacité au multitâche, mesurée à travers deux dimensions, soit la capacité individuelle de multitâche (OSPAN) et la polychronicité, modère la relation entre le retour haptique et les variables d'effort perçu, de charge cognitive perçue et de niveau de stress. Autrement dit, les individus plus efficaces dans la gestion multitâche devraient bénéficier davantage du retour haptique en termes de réduction de la charge cognitive et de l'effort perçu.

H5 : Effet de l'efficacité multitâche mesurée par OSPAN

Concernant les différences individuelles, les résultats montrent une tendance intéressante. Les analyses effectuées à partir du score OSPAN (indicateur de la capacité de multitâche) ne révèlent pas d'effet significatif du modérateur sur les variables de charge. Le modèle pour l'effort perçu ($\beta = 25.90$, $t(21) = 1.66$, $p = 0.056$) et pour la charge cognitive perçue ($\beta = 17.40$, $t(21) = 1.47$, $p = 0.078$) indique un effet marginalement significatif, suggérant une tendance selon laquelle les participants ayant un score OSPAN plus élevé, c'est-à-dire une meilleure capacité à maintenir et manipuler l'information ou tout simplement à effectuer du *multitasking*, pourraient percevoir un effort ou une charge cognitive différent(e) selon la condition haptique. Aucune interaction significative n'a été observée pour les indicateurs physiologiques du stress mesurés par la fréquence respiratoire ($\beta = 0.17$, $t(22) = -0.36$, $p = 0.639$) et la fréquence cardiaque ($\beta = 0.52$, $t(22) = -0.33$, $p = 0.701$). Ces résultats montrent que la capacité de multitâche (OSPAN) modifie de manière marginalement significative l'effet du retour haptique sur l'effort et la charge cognitive perçus.

H5 : Effet de l'efficacité multitâche mesurée par la polychronicité

De même, les analyses portant sur la polychronicité ne montrent aucune interaction significative avec le retour haptique sur les variables présentées. Les résultats pour l'effort

perçu ($\beta = 0.77$, $t(23) = 0.84$, $p = 0.470$), et pour la charge cognitive perçue ($\beta = 1.63$, $t(23) = 0.23$, $p = 0.410$) montrent qu'une personne plus polychrone n'influence pas l'effet du retour haptique. Les mesures physiologiques du stress confirment cette absence d'effet modérateur : la fréquence respiratoire ($\beta = -0.050$, $t(22) = -0.13$, $p = 0.550$) et la fréquence cardiaque ($\beta = 0.52$, $t(22) = 0.64$, $p = 0.736$) demeurent non significatives.

Dans l'ensemble, les résultats indiquent que l'efficacité multitâche, mesurée par le score OSPAN ou la polychronicité, n'a pas modulé significativement l'effet du retour haptique sur les variables d'effort perçu, de charge cognitive perçue et de niveau de stress. Une tendance marginale est observée entre le score OSPAN et l'effort perçu, ainsi que la charge cognitive perçue. Ainsi, l'hypothèse H5 est partiellement supportée. Ces résultats indiquent que la capacité ou la préférence individuelle à gérer plusieurs tâches simultanément n'a pas amplifié ni atténué les effets du retour haptique sur la charge perçue ou physiologique dans ce contexte de simulation de conduite policière.

H6 : Effet conjoint du retour haptique, de la demande multitâche et de l'efficacité individuelle au multitâche sur la performance

L'hypothèse H6 postulait qu'il existerait une interaction triple entre le retour haptique, le niveau de demande multitâche et l'efficacité au multitâche (mesurée par le score OSPAN et la polychronicité), influençant la performance et l'expérience vécue des participants (effort perçu, charge cognitive perçue et niveau de stress). Autrement dit, l'effet du retour haptique sur la performance devait varier simultanément selon le niveau de demande multitâche de la tâche et le niveau d'efficacité individuelle en multitâche.

H6 : Interaction triple avec l'efficacité au multitâche mesurée par le score OSPAN

Les résultats montrent un effet marginalement significatif entre le score OSPAN, le retour haptique et la demande multitâche sur la distance au centre de la voie ($\beta = -2.16$, $t(20) = -1.74$, $p = 0.097$). Ce résultat indique qu'une personne avec de meilleures capacités multitâches pourrait moduler l'effet du retour haptique sur la précision du positionnement du véhicule sur la voie, bien que cet effet demeure faible et marginal. En revanche, aucune interaction significative n'a été observée pour l'effort perçu ($\beta = -104.60$, $t(21) = -0.31$, $p = 0.7601$), ni pour

la charge cognitive perçue ($\beta = -9.76$, $t(21) = -0.04$, $p = 0.969$). Ces résultats montrent qu'une capacité en multitâche élevée n'a pas amplifié ni atténué l'effet du retour haptique sur les perceptions subjectives de charge de manière significative. Concernant les mesures physiologiques du stress, la fréquence cardiaque montre une tendance non significative ($\beta = 166.38$, $t(20) = 1.56$, $p = 0.135$), tandis que la fréquence respiratoire demeure également non significative ($\beta = 13.99$, $t(20) = 0.67$, $p = 0.513$). Ces résultats indiquent que les capacités multitâches mesurées par l'OSPAN ne modulent pas significativement l'effet conjoint de la tâche et du retour haptique sur les perceptions subjectives ou les réponses physiologiques de stress.

H6 : Interaction triple avec l'efficacité au multitâche mesurée par la polychronicité

L'analyse portant sur la polychronicité met également en évidence des résultats partiels. Un effet marginalement significatif est observé pour la vitesse moyenne ($\beta = 3.70$, $t(20) = 1.77$, $p = 0.092$), laissant penser que les individus ayant une forte préférence pour le multitâche pourraient ajuster différemment leur vitesse en présence d'un retour haptique, notamment sous forte demande multitâche. Aucune interaction significative n'est observée pour la performance perçue ($\beta = -0.36$, $t(21) = -0.28$, $p = 0.784$), le contrôle du volant ($\beta = -0.0002$, $t(20) = -0.01$, $p = 0.989$), la distance du centre de la voie ($\beta = 0.05$, $t(20) = 0.48$, $p = 0.638$), l'effort perçu ($\beta = 33.35$, $t(21) = 1.47$, $p = 0.157$) ou la charge cognitive perçue ($\beta = 20.97$, $t(21) = 1.23$, $p = 0.234$).

Cela dit, une interaction significative est observée pour la fréquence cardiaque ($\beta = -15.89$, $t(20) = -2.22$, $p = 0.038$). Ce résultat indique que les participants présentant un niveau élevé de polychronicité tendent à manifester une activation physiologique plus faible, soit une fréquence cardiaque réduite, en condition haptique sous forte demande multitâche. Toutefois, dans la mesure où cet indicateur n'était pas central à l'hypothèse initiale, ce résultat doit être interprété avec prudence et est considéré comme exploratoire.

Dans l'ensemble, les résultats de cette analyse triple interaction révèlent deux effets intéressants. Tout d'abord, un effet marginalement significatif entre les capacités multitâches mesurées par l'OSPAN et la distance au centre de la voie, montre une légère modulation de la stabilité latérale (distance du centre de la voie) en fonction du niveau de multitâche. Ensuite, un effet significatif entre la polychronicité et la fréquence cardiaque, indique une possible

réduction du stress physiologique chez les individus plus polychrones lors de tâches à forte demande multitâche combinées à un retour haptique. Ces résultats, bien que partiels, vont dans le sens de l'hypothèse selon laquelle les caractéristiques individuelles liées à l'efficacité multitâche peuvent influencer la manière dont les conducteurs perçoivent et s'adaptent à la stimulation haptique dans un contexte exigeant. Toutefois, la majorité des effets observés demeurent non significatifs, suggérant que la combinaison simultanée de ces trois facteurs produit une interaction faible sur la performance globale. Ainsi, l'hypothèse H6 est partiellement supportée, en raison de la présence d'un effet significatif pour la fréquence cardiaque et des effets marginaux observés pour la distance au centre de la voie et la vitesse.

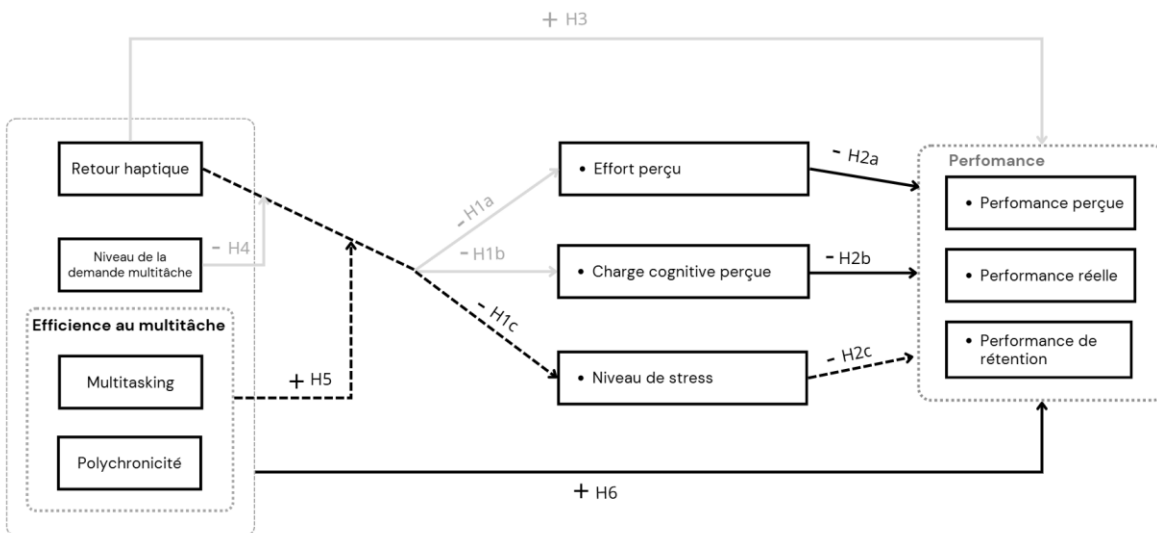
Afin de synthétiser l'ensemble des analyses réalisées et de faciliter l'interprétation des effets observés, le tableau 5 offre un résumé détaillé des hypothèses et la figure 7 présente le modèle de recherche annoté en fonction des résultats obtenus pour chacune des hypothèses. Les flèches pleines et pointillées permettent de visualiser respectivement les relations significatives et marginalement significatives au sein du modèle testé.

Tableau 5. Résumé des hypothèses et de leurs résultats

Hypothèses	VI	VD	Estimation	t-value	p-value	Statut
H1a	Haptique	Effort perçu	3.12	0.4	0.655	Non supporté
H1b	Haptique	Charge cognitive	0.88	0.16	0.563	Non supporté
H1c(bpm)	Haptique	Fréquence cardiaque	0.76	1.2	0.121	Non supporté
H1c(respiration)	Haptique	Respiration	0.47	1.53	0.070	Non supportée
H2a	Effort perçu	Performance perçue	-0.0115	-1.49	0.071	Marginalement supportée
H2b	Effort perçu	Contrôle du volant	-0.0004	-4.3	<.001	Supportée
	Charge cognitive	Performance perçue	-0.0220	-2.12	0.019	Supportée
H2c	Charge cognitive	Contrôle du volant	-0.0004	-3.5	0.001	Supportée
	Fréquence cardiaque	Performance perçue	-0.0408	-1.38	0.087	Marginalement supportée
H3	Haptique	Performance perçue	-0.388	-0.99	0.833	Non supporté
	Haptique	Vitesse	-0.4378	-0.57	0.713	Non supporté
	Haptique	Contrôle du volant	-0.391	-0.99	0.666	Non supporté
	Haptique	Distance du centre de la voie	0.0033	0.29	0.386	Non supporté
H4	Niveau de demande de multitâche	Effort perçu	5.6218	0.35	0.636	Non supporté
	Niveau de demande de multitâche	Charge cognitive	11.5633	0.98	0.831	Non supporté
	Niveau de demande de multitâche	Respiration	0.8573	0.84	0.795	Non supporté

	Niveau de demande de multitâche	Fréquence cardiaque	-1.8641	-0.34	0.367	Non supporté
H5	Multitasking	Effort perçu	25.8989	1.66	0.056	Marginalement supportée
	Multitasking	Charge cognitive	17.4044	1.47	0.078	Marginalement supportée
	Polychronicité	Respiration	-0.0497	-0.13	0.550	Non supporté
	Polychronicité	Fréquence cardiaque	0.5145	0.64	0.736	Non supporté
H6	haptique tâche Ospan_score	Distance du centre de la voie	-2.1610	-1.74	0.097	Marginalement supportée
	haptique tâche PChron	Vitesse	3.7021	1.77	0.092	Marginalement supportée

Figure 7. Modèle de recherche avec les résultats des hypothèses



Note : Une flèche pleine représente un résultat significatif (< 0.05). Une flèche pointillée représente un résultat marginalement significatif (< 0.10).

2.5 Discussion

La présente étude s'inscrit dans un contexte où la formation policière doit composer avec des environnements de conduite de plus en plus complexes, marqués par une forte demande multitâche et un risque élevé de surcharge cognitive. Les simulateurs immersifs constituent un outil pédagogique privilégié pour exposer les apprenants à ces situations sans compromettre leur sécurité, mais leur efficacité dépend de la capacité à soutenir l'allocation attentionnelle

tout en préservant le réalisme des opérations sur terrain. Dans cette perspective, le retour haptique a été proposé comme une modalité sensorielle susceptible d'alléger la sollicitation des canaux visuel et auditif et soutenir un engagement cognitif plus propice à l'apprentissage en situation multitâche.

C'est dans ce cadre que l'objectif de cette étude était d'examiner l'impact du retour haptique sur la charge cognitive, le stress physiologique, la performance de conduite et l'expérience vécue sur ce type de simulateur, ainsi que le rôle modérateur du multitâche dans ce rapport. Le tout a été étudié dans un contexte de simulation de conduite policière, comportant une tâche simple (T1) et une tâche multitâche avec dispatch audio (T2). Bien que certains résultats s'éloignent des attentes initiales, plusieurs enseignements pertinents émergent et contribuent à une meilleure compréhension de l'utilisation du retour haptique en contexte de formation policière.

2.5.1 Interprétation des résultats principaux

Les résultats montrent d'abord que le retour haptique n'a pas permis de réduire l'effort ou la charge cognitive perçus, contrairement à ce qui était attendu. De manière générale, les résultats montrent que l'effet du retour haptique demeure limité et plus nuancé que ce qui était anticipé. Contrairement aux hypothèses H1a et H1b, la présence du retour haptique n'a pas réduit de manière significative l'effort perçu ni la charge cognitive déclarée par les participants. La présence du retour haptique n'a pas non plus provoqué de diminution claire du stress physiologique, tel que présumé par l'hypothèses H1c. Au contraire, une tendance marginale indiquant une augmentation de la fréquence respiratoire a été observée. Ces résultats s'éloignent des travaux ayant montré que le retour haptique peut alléger la charge cognitive lorsqu'il relaie des informations critiques ou structure la perception du mouvement (Bazilinskyy et al., 2018; Chang et al., 2011). Dans le présent protocole, le retour haptique semble plutôt générer une légère augmentation de l'activation physiologique sans se traduire par une diminution explicite de la charge perçue. Cela suggère que, dans des scénarios relativement courts et auprès de participants novices, l'haptique agit davantage comme un enrichissement perceptif que comme un mécanisme compensatoire qui modifie de manière substantielle la perception de la charge mentale.

En ce qui concerne la relation entre charge mentale et performance (H2a à H2c), les résultats montrent que certaines dimensions de la charge sont bel et bien liées à la performance de conduite. Un effort perçu ou une charge cognitive plus élevés sont associés à une détérioration du contrôle latéral du véhicule, mesuré par la distance du centre de la voie, ce qui soutient partiellement les hypothèses selon lesquelles une surcharge cognitive nuit à la performance. Cette observation rejoint la Multiple Resource Theory (Wickens, 2008), selon laquelle une surcharge de ressources visuo-motrices entraîne une perte de précision directionnelle, et correspond également à la *threaded cognition* (Salvucci & Taatgen, 2011), où un goulot attentionnel limite la gestion simultanée de processus compétitifs. Toutefois, des relations inattendues apparaissent également, notamment une association positive entre l'effort ou la charge cognitive et la vitesse moyenne, ce qui pourrait refléter une stratégie de compensation ou un comportement de conduite plus risqué sous pression. Il s'agit d'un résultat plutôt contrasté par rapport à certaines études qui associent la surcharge à un ralentissement (Strayer & Johnston, 2001). Cette divergence pourrait refléter une stratégie compensatoire adoptée par des conducteurs novices, cherchant à simplifier la tâche en adoptant une vitesse plus stable ou en réagissant impulsivement sous pression. À l'inverse, le stress physiologique, mesuré par la fréquence cardiaque et respiratoire, ne semble pas influencer de manière significative la performance de conduite ou la performance de rétention. Ce résultat contraste partiellement avec les conclusions de Collet et al. (2009), qui rapportent qu'une augmentation de l'activation physiologique en situation de double tâche s'accompagne généralement d'une dégradation de certains indicateurs de performance de conduite (Collet et al., 2009).

Le passage de la conduite simple à faible demande multitâche (T1) à la conduite avec dispatch policier à haute demande multitâche (T2) a bien accru la demande cognitive, mais cette augmentation n'a pas suffi à amplifier l'effet du retour haptique comme le prévoyait l'hypothèse H4. Il est possible que l'écart entre les tâches n'ait pas généré une surcharge assez marquée pour révéler un effet différentiel. De plus, dans le cas de l'efficacité multitâche mesurée par l'OSPAN (H5), les résultats révèlent des effets marginalement significatifs sur l'effort perçu ($p = 0.056$) et sur la charge cognitive perçue ($p = 0.078$). Ces observations indiquent que la capacité à maintenir et manipuler l'information pourrait moduler partiellement la manière dont les participants expérimentent la condition haptique. Autrement dit, même si l'effet n'est pas robuste statistiquement, une influence de l'OSPAN apparaît dans la perception

de l'effort et de la charge perçus, suggérant que l'efficacité du retour haptique pourrait dépendre en partie des capacités cognitives de l'apprenant. Par ailleurs, aucune interaction significative n'a été observée entre l'OSPAN et les mesures physiologiques de stress, ce qui laisse entendre que le rôle modérateur de l'efficacité multitâche se manifeste davantage dans la sphère subjective que physiologique.

L'hypothèse H6, qui postulait une interaction triple entre l'haptique, la demande multitâche et l'efficacité multitâche, n'est pas supportée de manière globale. Les analyses mettent toutefois en évidence certains effets ponctuels qui permettent de nuancer ces résultats. D'une part, un effet marginal du score OSPAN est observé sur la distance au centre de la voie, suggérant que les individus ayant une meilleure capacité de multitâche pourraient légèrement mieux bénéficier du retour haptique pour maintenir leur stabilité latérale dans des tâches exigeantes. Ce résultat s'inscrit dans la lignée des travaux de Conway et al. (2005), qui associent la mémoire de travail à de meilleures capacités de coordination en contexte multitâche (Conway et al., 2005). D'autre part, un effet significatif impliquant la polychronicité est observé sur la fréquence cardiaque. Ce résultat indique que les individus plus enclins à gérer plusieurs tâches simultanément présentent une activation physiologique plus faible face au stress lorsqu'ils sont exposés au retour haptique sous forte demande multitâche. Toutefois, dans la mesure où cet indicateur ne constituait pas une variable centrale de l'hypothèse initiale, cet effet doit être interprété et considéré comme exploratoire. Pris ensemble, ces résultats suggèrent que l'efficacité du retour haptique pourrait varier en fonction de certaines caractéristiques individuelles, bien que ces effets demeurent spécifiques à certaines mesures et nécessitent d'être confirmés par des analyses complémentaires. Cette interprétation est cohérente avec les travaux récents indiquant que certains profils multitâches s'adaptent plus efficacement aux environnements multisensoriels complexes (Luo et al., 2023).

2.5.2 Rôle du multitâche et des différences individuelles

L'étude visait à mieux comprendre comment le multitâche influence la pertinence du retour haptique dans la conduite en simulation. Les résultats ne montrent pas concrètement que le niveau de demande multitâche modère l'effet du retour haptique, ce qui peut être expliqué par deux facteurs. D'une part, la différence entre les tâches à niveau de demande multitâche faible et élevé pourrait ne pas avoir généré une surcharge cognitive assez importante pour révéler un

effet différentiel, aussi observé dans des études comparables (Horrey & Wickens, 2006). D'autre part, la majorité des participants, principalement des étudiants de première année en technique policière, n'ayant jamais été exposés à un simulateur de conduite dans leur formation, pourraient avoir perçu l'ensemble des tâches comme exigeantes, indépendamment de leur niveau réel de complexité.

Bien que les interactions triples ne soient pas toutes significatives, des tendances cohérentes apparaissent au regard des différences individuelles en multitâche. Les effets modérateurs des capacités multitâches (OSPAN) et de la polychronicité montrent des signaux non négligeables: les participants plus efficaces en multitâche tendent à percevoir moins de charge ou à conduire plus efficacement en condition haptique lors d'une tâche multitâche. Ces résultats indiquent que le retour haptique pourrait être utile de façon sélective, c'est-à-dire auprès d'individus ayant des capacités élevées pour gérer simultanément plusieurs flux d'information. Cette observation est cohérente avec les modèles du contrôle attentionnel selon lesquels le multitâche efficace dépend largement de la capacité à maintenir l'information pertinente tout en inhibant les distractions (Conway et al., 2005), et converge avec les travaux sur l'adaptation des interfaces aux profils cognitifs, montrant que l'efficacité des signaux haptiques dépend du style attentionnel de l'utilisateur (Guo et al., 2024).

2.5.3 Implications

Les résultats de cette étude apportent plusieurs contributions, tant sur le plan théorique que pratique, à la compréhension de l'utilisation du retour haptique en contexte de conduite multitâche, particulièrement dans la formation policière.

Implications théoriques

Sur le plan théorique, cette recherche soutient les cadres expliquant les effets de surcharge cognitive en situation de conduite. Les résultats corroborent partiellement la *Multiple Resource Theory* de Wickens selon laquelle la réalisation simultanée de tâches mobilisant des ressources cognitives similaires entraîne des interférences et une baisse de performance (Wickens, 2008). L'association entre effort perçu, charge cognitive et dégradation du contrôle latéral, mesuré par la distance du centre de la voie, s'inscrit dans cette logique: lorsque la tâche multitâche augmente la sollicitation du canal auditif et des ressources centrales, la précision de conduite

décline, ce qui confirme le principe d'interférence intermodale. De même, certains résultats rejoignent la théorie de la « threaded cognition » de Salvucci et Taatgen, qui conçoit le multitâche comme une coordination de processus concurrents passant par un goulot attentionnel limité (Salvucci & Taatgen, 2011). L'absence d'amélioration de la charge mentale sous condition haptique suggère que l'ajout d'un signal tactile n'a pas suffi à contourner ce goulot cognitif. Autrement dit, même si le retour haptique active un canal sensoriel distinct, son traitement cognitif demeure soumis aux limites d'un système attentionnel central déjà fortement mobilisé par les demandes concurrentes de la tâche de dispatch (T2 : à forte demande en multitâche). Néanmoins, le retour haptique ne s'est pas traduit par une réduction significative de la charge mentale. Ceci nuance certaines recherches suggérant que les signaux haptiques peuvent alléger la charge cognitive en fournissant une voie sensorielle alternative (Bazilinskyy et al., 2018; Ho et al., 2006). Dans cette étude, l'haptique semble plutôt induire un engagement cognitif accru sans réduction immédiate des coûts attentionnels, suggérant que le bénéfice de la vibration pourrait dépendre du niveau d'expertise, de la durée d'exposition ou du design des paramètres haptiques (intensité, fréquence, synchronisation). Les résultats montrent également que l'effet du retour haptique pourrait varier selon les caractéristiques individuelles. Bien que limitées, les interactions observées entre polychronicité, tâches multitâches et stress physiologique suggèrent que certaines personnes, notamment celles plus enclines au multitâche pourraient mieux intégrer l'haptique dans des situations exigeantes. Ce constat s'inscrit dans un courant émergent de la littérature qui souligne que les technologies haptiques ne sont pas nécessairement universelles, mais peuvent interagir avec des facteurs cognitifs propres à chaque individu (Luo et al., 2021; Sun et al., 2024; Weng et al., 2020). Ainsi, cette étude contribue à enrichir les modèles théoriques en montrant que le haptique ne constitue pas simplement une modalité sensorielle supplémentaire, mais un outil dont les effets dépendent des caractéristiques du système cognitif, des propriétés du signal et du contexte multitâche dans lequel il s'insère. Elle souligne également la nécessité d'intégrer davantage la dimension des différences interindividuelles dans les théories actuelles du multitâche.

Implications pratiques

Sur le plan appliqué, ce mémoire contribue à la réflexion sur l'intégration des dispositifs haptiques dans la formation policière. Bien que l'haptique n'améliore pas directement la

performance globale dans cette étude, il ne génère pas non plus de surcharge supplémentaire, ce qui en fait une technologie compatible avec l'entraînement en conduite simulée pour amplifier l'effet d'immersion des apprenants. Légèrement associé à une hausse d'activation physiologique lié au stress, il pourrait traduire une implication cognitive accrue de ces derniers, ce qui est particulièrement pertinent dans une logique pédagogique de simulation réaliste (Park et al., 2024). Dans les environnements simulés, un niveau d'activation modéré est souvent associé à un engagement plus profond et à une meilleure consolidation des compétences en situation à haut risque. Cela signifie que l'haptique pourrait jouer un rôle dans la préparation mentale des futurs policiers en les exposant à des conditions réalistes sans les placer en danger. Les résultats soulignent également l'importance de tenir compte des différences individuelles. Les tendances, indiquant que les participants plus efficaces en multitâche tirent davantage profit du retour haptique, ouvrent la voie à des dispositifs de formation adaptatifs. Ainsi, plutôt que d'appliquer un signal haptique uniforme, les simulateurs pourraient ajuster l'intensité, la fréquence ou la nature du retour haptique en fonction du profil cognitif des apprenants, de leur progression ou de leur performance en temps réel. Ces résultats encouragent l'utilisation du retour haptique, non pas comme un outil de réduction de charge immédiate, mais comme un support sensoriel favorisant l'attention, la perception des dynamiques du véhicule et l'engagement. Pour les écoles de police, cela signifie qu'intégrer progressivement l'haptique dès les scénarios d'entraînement pourrait préparer les recrues à des environnements complexes typiques des interventions réelles (conduite d'urgence, surveillance, navigation radio).

2.5.4 Limites de l'étude

Cette étude comporte certaines limites qu'il convient de considérer. D'abord, le choix d'un protocole exploratoire impliquant des tâches de conduite répétées, des mesures physiologiques et un retour haptique expérimental a nécessité de limiter la taille de l'échantillon. Le recrutement de vingt-cinq participants permettait de maintenir une durée raisonnable de collecte par participant et d'assurer la qualité des données, mais cette taille restreinte réduit la puissance statistique des résultats. Ce choix méthodologique pourrait expliquer en partie l'absence d'effets significatifs pour certaines hypothèses, particulièrement celles portant sur les interactions complexes. De plus, le profil des participants représente également une conséquence directe du design expérimental. Pour assurer la cohérence des procédures, l'étude

a recruté principalement des étudiants de première année en technique policière, n'ayant jamais utilisé un simulateur de conduite. Cette décision permettait de standardiser le niveau d'expérience, mais crée un écart par rapport à la population cible de l'étude, soit les conducteurs policiers en formation avancée ou en exercice, et limite la portée de la généralisation des résultats. Par ailleurs, un autre choix méthodologique important concerne la durée volontairement limitée des scénarios. Afin de maintenir un protocole contrôlé, comparable entre participants et sans induire de fatigue excessive, les tâches T1 et T2 ont été standardisées à des durées relativement courtes. Bien que ce choix garantisse un contrôle expérimental rigoureux, il peut avoir réduit l'apparition graduelle d'une surcharge cognitive différenciée entre les tâches, phénomène généralement plus marqué lors de scénarios continus ou prolongés. De plus, la manipulation du retour haptique se limitait à un seul paramètre de présence ou d'absence du retour haptique. Cette approche isolait son effet principal, mais ne permettait pas d'explorer la richesse des paramètres haptiques disponibles (intensité, fréquence, localisation, *timing*), ni d'identifier quelles composantes spécifiques sont les plus efficaces pour soutenir la performance ou réduire la charge cognitive. Enfin, l'ordre des tâches, bien que contrebalancé, peut avoir introduit des effets d'apprentissage ou d'adaptation au simulateur, surtout chez des utilisateurs novices. Malgré les précautions méthodologiques, cette dynamique peut avoir atténué certains contrastes entre conditions. Cela dit, ces limites n'invalident pas les résultats obtenus, mais soulignent la nécessité de poursuivre les travaux avec des échantillons plus représentatifs, des scénarios plus écologiquement valides et une manipulation plus fine des stimulations haptiques. Elles soulignent aussi la nécessité d'élargir le champ expérimental pour raffiner et confirmer les tendances observées.

2.5.5 Pistes de recherche futures

Les limites découlant des choix méthodologiques offrent plusieurs avenues pour des recherches futures. Les études futures gagneraient à inclure des échantillons plus larges et représentatifs de la population policière professionnelle et en formation (aspirants policiers en fin de formation, agents en service actif ou instructeurs). Il serait également pertinent de développer des scénarios plus longs et dynamiques, reproduisant mieux la complexité cognitive des situations policières telles que les poursuites, la coordination radio-terrain ou les interventions d'urgence. L'augmentation progressive de la demande multitâche pourrait

permettre de tester plus finement l'apparition de la surcharge cognitive et les moments où l'haptique devient réellement bénéfique. Par ailleurs, une autre piste essentielle concerne l'exploration systématique des paramètres haptiques. Explorer différents profils haptiques (localisation, fréquence, intensité, variations temporelles) pourrait offrir une meilleure compréhension des configurations les plus efficaces. L'intégration de signaux haptiques intelligents, ajustés en temps réel selon la performance, représente une avenue particulièrement prometteuse pour les environnements d'entraînement immersif. Finalement, l'intégration de systèmes adaptatifs, ajustant le retour haptique en fonction de mesures physiologiques continues, telles que l'électroencéphalogramme (EEG), la pupillométrie ou la conductance de la peau, pourrait contribuer à développer des simulateurs capables de s'ajuster dynamiquement, ouvrant la voie à des systèmes de formation personnalisés et adaptatifs.

2.6 Conclusion

L'objectif de ce mémoire était d'examiner le rôle du retour haptique dans un contexte de formation policière simulée, plus particulièrement lors de tâches de conduite exigeant une gestion multitâche. En s'appuyant sur les théories de la charge cognitive et des ressources multiples, le projet visait à déterminer si le retour haptique pouvait réduire la charge mentale, favoriser la performance ou encore agir comme soutien sensoriel dans les moments où les ressources visuelles et auditives sont fortement sollicitées. La recherche s'est également intéressée au rôle des différences individuelles du comportement multitâche afin de mieux comprendre l'hétérogénéité des réactions à la stimulation haptique.

Les résultats n'ont pas mis en évidence une diminution directe de la charge cognitive ou de l'effort mental avec le retour haptique, ni une amélioration immédiate et globale de la performance de conduite. Toutefois, il engendre une activation physiologique légèrement plus élevée, laquelle peut être associée à une implication cognitive accrue dans la tâche. Par ailleurs, les relations attendues entre surcharge et diminution de performance ont été partiellement démontrés, notamment pour l'effort perçu. Nous avons démontré que même si les interactions triples ne sont pas significatives, des tendances indiquent que les apprenants ayant une efficacité multitâche plus élevée pourraient bénéficier davantage du retour haptique lorsque la tâche gagne en complexité.

Ainsi, bien que plusieurs hypothèses n'aient pas été confirmées statistiquement, cette étude contribue à la littérature sur la formation policière simulée en apportant deux constats importants. Premièrement, le retour haptique ne constitue pas une solution universelle pour la réduction de la charge mentale en conduite, et son implémentation doit être réfléchie, voire améliorer. Deuxièmement, l'efficacité du retour haptique pourrait dépendre des caractéristiques cognitives des apprenants, ce qui souligne l'importance d'envisager des systèmes d'entraînement personnalisés et adaptatifs.

Bien que cette étude repose sur un échantillon de taille modeste et des scénarios de conduite volontairement concis afin d'assurer un contrôle expérimental rigoureux, elle constitue une première étape structurée pour examiner le rôle du retour haptique dans l'entraînement à la conduite policière. Ces choix méthodologiques offrent une base solide sur laquelle des recherches futures pourront s'appuyer. Dans la continuité de ces travaux, il serait pertinent d'élargir l'échantillon à des élèves policiers plus avancés dans leur formation ou à des agents en exercice, d'augmenter la durée et la complexité des scénarios afin de se rapprocher davantage des exigences du terrain, et d'exploiter pleinement la variabilité des paramètres haptiques. Par ailleurs, l'intégration de mesures physiologiques complémentaires telles que l'EEG, la pupillométrie ou la conductance électrodermale permettrait d'affiner la compréhension des états cognitifs et émotionnels des apprenants en temps réel, renforçant ainsi la validité et la portée applicative de ce champ de recherche.

En conclusion, les résultats obtenus ouvrent une voie de recherche prometteuse quant à l'utilisation du retour haptique comme soutien contextuel dans les environnements de formation immersive. Si son efficacité n'apparaît pas uniforme, son potentiel ciblé pourrait favoriser l'acquisition de compétences essentielles en conduite multitâche chez nos futurs policiers. Dans un contexte où la sécurité opérationnelle dépend de la capacité à gérer simultanément la conduite, la communication radio et les imprévus du terrain, cette perspective demeure d'une pertinence particulièrement élevée pour l'avenir des pratiques formatives.

Références

- Baelen, D. V., Paassen, M. M. (René) van, Ellerbroek, J., Abbink, D. A., & Mulder, M. (2021). Flying by Feeling : Communicating Flight Envelope Protection through Haptic Feedback. *International Journal of Human-Computer Interaction*. (world). <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10447318.2021.1890489>
- Bazilinskyy, P., Petermeijer, S. M., Petrovych, V., Dodou, D., & de Winter, J. C. F. (2018). Take-over requests in highly automated driving : A crowdsourcing survey on auditory, vibrotactile, and visual displays. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 56, 82-98. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.04.001>
- Bluedorn, A. C., Kalliath, T. J., Strube, M. J., & Martin, G. D. (1999). Polychronicity and the Inventory of Polychronic Values (IPV). *Journal of Managerial Psychology*, 14(3/4), 205-231. <https://doi.org/10.1108/02683949910263747>
- Brookhuis, K. A., & de Waard, D. (2010). Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident; Analysis and Prevention*, 42(3), 898-903. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.06.001>
- Caird, J. K., Johnston, K. A., Willness, C. R., Asbridge, M., & Steel, P. (2014). A meta-analysis of the effects of texting on driving. *Accident; Analysis and Prevention*, 71, 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.005>
- Chang, W., Hwang, W., & Ji, Y. G. (2011). Haptic Seat Interfaces for Driver Information and Warning Systems. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 27(12), 1119-1132. <https://doi.org/10.1080/10447318.2011.555321>

- Collet, C., Clarion, A., Morel, M., Chapon, A., & Petit, C. (2009). Physiological and behavioural changes associated to the management of secondary tasks while driving. *Applied Ergonomics*, 40(6), 1041-1046. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.01.007>
- Conway, A. R. A., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O., & Engle, R. W. (2005). Working memory span tasks : A methodological review and user's guide. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(5), 769-786. <https://doi.org/10.3758/bf03196772>
- ENPQ. (s. d.). Consulté 29 septembre 2025, à l'adresse <https://www.enpq.qc.ca/futur-policier/etapes-dadmission/contingement>
- Gaffary, Y., & Lécuyer, A. (2018). The Use of Haptic and Tactile Information in the Car to Improve Driving Safety : A Review of Current Technologies. *Frontiers in ICT*, 5. <https://doi.org/10.3389/fict.2018.00005>
- Grassmann, M., Vlemincx, E., von Leupoldt, A., Mittelstädt, J. M., & Van den Bergh, O. (2016). Respiratory Changes in Response to Cognitive Load : A Systematic Review. *Neural Plasticity*, 2016, 8146809. <https://doi.org/10.1155/2016/8146809>
- Guo, Y., Wang, Y., Tong, Q., Shan, B., He, L., Zhang, Y., & Wang, D. (2024). Active electronic skin : An interface towards ambient haptic feedback on physical surfaces. *Npj Flexible Electronics*, 8(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s41528-024-00311-5>
- Guru, K. A., Shafiei, S. B., Khan, A., Hussein, A. A., Sharif, M., & Esfahani, E. T. (2015). Understanding Cognitive Performance During Robot-Assisted Surgery. *Urology*, 86(4), 751-757. <https://doi.org/10.1016/j.urology.2015.07.028>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of Empirical and Theoretical Research. Dans P. A. Hancock & N. Meshkati

- (Éds.), *Advances in Psychology* (Vol. 52, p. 139-183). North-Holland.
[https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hidalgo-Muñoz, A. R., Béquet, A. J., Astier-Juvenon, M., Pépin, G., Fort, A., Jallais, C., Tattegrain, H., & Gabaude, C. (2019). Respiration and Heart Rate Modulation Due to Competing Cognitive Tasks While Driving. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00525>
- Ho, C., Tan, H. Z., & Spence, C. (2006). The differential effect of vibrotactile and auditory cues on visual spatial attention. *Ergonomics*, 49(7), 724-738.
<https://doi.org/10.1080/00140130600589887>
- Hockey, G. R. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload; a cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45(1-3), 73-93. [https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(96\)05223-4](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(96)05223-4)
- Horrey, W. J., & Wickens, C. D. (2006). Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques. *Human Factors*, 48(1), 196-205.
<https://doi.org/10.1518/001872006776412135>
- Jeon, M. (2024). The Effects of Emotions on Trust in Human-Computer Interaction : A Survey and Prospect. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 40(22), 6864-6882. <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2261727>
- Luo, R., Weng, Y., Wang, Y., Jayakumar, P., Brudnak, M. J., Paul, V., Desaraju, V. R., Stein, J. L., Ersal, T., & Yang, X. J. (2021). A workload adaptive haptic shared control scheme for semi-autonomous driving. *Accident Analysis & Prevention*, 152, 105968.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105968>

- Luo, Y.-F., Kang, S., Yang, S., & Lu, C. (2023). The relationships among Taiwanese youth's polychronicity, multitasking behavior and perceived learning performance in online learning. *Frontiers in Psychology*, 14, 1131765. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1131765>
- Matthews, G., Reinerman-Jones, L. E., Barber, D. J., & Abich, J. (2015). The psychometrics of mental workload : Multiple measures are sensitive but divergent. *Human Factors*, 57(1), 125-143. <https://doi.org/10.1177/0018720814539505>
- Mehler, B., Reimer, B., & Coughlin, J. F. (2010). Physiological Reactivity to Graded Levels of Cognitive Workload across Three Age Groups : An On-Road Evaluation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 54(24), 2062-2066. <https://doi.org/10.1177/154193121005402409>
- Meng, F., & Spence, C. (2015). Tactile warning signals for in-vehicle systems. *Accident; Analysis and Prevention*, 75, 333-346. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.12.013>
- Nadj, M., Rißler, R., Adam, M., Knierim, M., Li, M., Maedche, A., & Riedl, R. (2023). What Disrupts Flow in Office Work? The Impact of Frequency and Relevance of IT-Mediated Interruptions. *MIS Quarterly*, 47, 1615-1646. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2023/17200>
- Neale, V., Dingus, T., Klauer, S., & Sudweeks, J. (2005). An overview of the 100-car naturalistic study and findings. *Proc. Int. Tech. Conf. Enhanced Safety Vehicles*, 19.
- Office québécois de la langue française. (s. d.). *Conduite préventive*. Consulté 10 novembre 2025, à l'adresse <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/2070369/conduite-preventive>

- Okamura, A. M. (2009). Haptic Feedback in Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery. *Current opinion in urology*, 19(1), 102-107. <https://doi.org/10.1097/MOU.0b013e32831a478c>
- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2004). Cognitive Load Theory : Instructional Implications of the Interaction between Information Structures and Cognitive Architecture. *Instructional Science*, 32, 1-8. <https://doi.org/10.1023/B:TRUC.0000021806.17516.d0>
- Park, J., Wozniak, D., & Zahabi, M. (2024). Modeling novice law enforcement officers' interaction with in-vehicle technology. *Applied Ergonomics*, 114, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.104154>
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks : Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116(2), 220-244. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.116.2.220>
- Petermeijer, S., Abbink, D., & de Winter, J. (2014). Should Drivers Be Operating Within an Automation-Free Bandwidth? Evaluating Haptic Steering Support Systems With Different Levels of Authority. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 57, 5-20. <https://doi.org/10.1177/0018720814563602>
- Petermeijer, S. M., Abbink, D. A., Mulder, M., & de Winter, J. C. F. (2015). The Effect of Haptic Support Systems on Driver Performance : A Literature Survey. *IEEE Transactions on Haptics*, 8(4), 467-479. <https://doi.org/10.1109/TOH.2015.2437871>
- Pietra, A., Vazquez Rull, M., Etzi, R., Gallace, A., Scurati, G. W., Ferrise, F., & Bordegoni, M. (2021). Promoting eco-driving behavior through multisensory stimulation : A preliminary study on the use of visual and haptic feedback in a virtual reality driving simulator. *Virtual Reality*, 25(4), 945-959. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00499-1>

- SAAQ. (2024). *Bilan routier 2021 : Baisse du nombre de personnes accidentées de 18,0 % par rapport à la moyenne de 2016 à 2020*. SAAQ.
<https://saaq.gouv.qc.ca/saaq/documentation/bilan-routier>
- Salvucci, D. D., & Taatgen, N. A. (2008). Threaded cognition : An integrated theory of concurrent multitasking. *Psychological Review*, 115(1), 101-130.
<https://doi.org/10.1037/0033-295X.115.1.101>
- Salvucci, D. D., & Taatgen, N. A. (2011). *The multitasking mind*. Oxford University Press.
[https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=YE-anWg_nNsC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Salvucci,+D.+D.,+%26+Taatgen,+N.+A.+\(2011\).+The+multitasking+mind.+Oxford+University+Press.&ots=R5yZnCS5da&sig=u5dl4pJAQe2VWiYUFukKUKU_a7Y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=YE-anWg_nNsC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Salvucci,+D.+D.,+%26+Taatgen,+N.+A.+(2011).+The+multitasking+mind.+Oxford+University+Press.&ots=R5yZnCS5da&sig=u5dl4pJAQe2VWiYUFukKUKU_a7Y#v=onepage&q&f=false)
- Sanders, T., Williams, C., & Carruth, D. (2012). *Sources of Cognitive Load in a Simulated Law Enforcement Patrol Task*.
- Strayer, D. L., & Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction : Dual-Task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone. *Psychological Science*, 12(6), 462-466.
<https://doi.org/10.1111/1467-9280.00386>
- Sun, B., Shan, Y., Wu, G., Zhao, S., & Xie, F. (2024). Personalized Shared Control for Automated Vehicles Considering Driving Capability and Styles. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(24), 7904. <https://doi.org/10.3390/s24247904>
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Tijerina, L., Johnston, S., Parmer, E., Pham, H. A., Winterbottom, M. D., & Barickman, F. S. (2000, septembre 1). *Preliminary Studies in Haptic Displays for Rear-End Collision*

Avoidance System and Adaptive Cruise Control System Applications.

<https://rosap.ntl.bts.gov>

Transports Canada. (2025, mai 15). *Statistiques sur les collisions de la route au Canada : 2023.*

Transports Canada. <https://tc.canada.ca/fr/transport-routier/statistiques-donnees/statistiques-collisions-route-canada/2023/statistiques-collisions-route-canada-2023>

Turner, M. L., & Engle, R. W. (1989). Is working memory capacity task dependent? *Journal of Memory and Language*, 28(2), 127-154. [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(89\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0749-596X(89)90040-5)

Unsworth, N., Heitz, R., Schrock, C., & Engle, R. (2005). An automated version of the Operation Span task. *Behavior research methods*, 37, 498-505. <https://doi.org/10.3758/BF03192720>

Villar, R., Beltrame, T., & Hughson, R. L. (2015). Validation of the Hexoskin wearable vest during lying, sitting, standing, and walking activities. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme*, 40(10), 1019-1024. <https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0140>

Wang, G., Wang, H.-H., & Ren, G. (2024). Visual and Haptic Guidance for Enhancing Target Search Performance in Dual-Task Settings. *Applied Sciences*, 14, 4650. <https://doi.org/10.3390/app14114650>

Watson, J. M., & Strayer, D. L. (2010). Supertaskers : Profiles in extraordinary multitasking ability. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(4), 479-485. <https://doi.org/10.3758/PBR.17.4.479>

- Weng, Y., Luo, R., Jayakumar, P., Brudnak, M. J., Paul, V., Desaraju, V. R., Stein, J. L., Yang, X. J., & Ersal, T. (2020). Design and Evaluation of a Workload-Adaptive Haptic Shared Control Framework for Semi-Autonomous Driving. *2020 American Control Conference (ACC)*, 4369-4374. <https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9147482>
- Wickens, C. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human factors*, 50, 449-455. <https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
- Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18(5), 459-482. <https://doi.org/10.1002/cne.920180503>
- Yurko, Y. Y., Scerbo, M. W., Prabhu, A. S., Acker, C. E., & Stefanidis, D. (2010). Higher mental workload is associated with poorer laparoscopic performance as measured by the NASA-TLX tool. *Simulation in Healthcare: Journal of the Society for Simulation in Healthcare*, 5(5), 267-271. <https://doi.org/10.1097/SIH.0b013e3181e3f329>
- Zahabi, M., Nasr, V., Mohammed Abdul Razak, A., Patranella, B., McCanless, L., & Maredia, A. (2023). Effect of Secondary Tasks on Police Officer Cognitive Workload and Performance Under Normal and Pursuit Driving Situations. *Human Factors*, 65(5), 809-822. <https://doi.org/10.1177/00187208211010956>

Chapitre 3 : Conclusion

3.1 Retour sur l'étude

Ce mémoire s'inscrit dans un contexte où la conduite policière représente une activité hautement multitâche, soumise à des exigences attentionnelles, décisionnelles et émotionnelles élevées. Alors que les simulateurs de conduite constituent un outil de formation de plus en plus répandu, la question de savoir si l'ajout d'un retour haptique peut soutenir l'apprentissage, réduire la charge mentale et améliorer la performance demeure largement ouverte dans la littérature scientifique. L'objectif principal de notre recherche était donc d'examiner l'effet du feedback haptique sur la charge cognitive, l'effort perçu, le stress physiologique et la performance dans un contexte de conduite policière simulée. Ce travail visait également à comprendre dans quelles conditions, selon le niveau de demande multitâche de la tâche et selon les caractéristiques individuelles (capacité multitâche et polychronicité), le retour haptique pouvait être bénéfique ou non.

Pour répondre à cet objectif général, six hypothèses principales (H1 à H6) ont été formulées. L'hypothèse H1 postulait un effet direct du retour haptique sur les variables de charge : réduction de l'effort (H1a), diminution de la charge cognitive perçue (H1b) et augmentation du stress (H1c). Les résultats n'ont pas confirmé les hypothèses H1a et H1b, indiquant que la présence du retour haptique n'a pas réduit la charge subjective globale. Par ailleurs, l'hypothèse H1c n'est pas supportée. Une légère augmentation de l'activation physiologique, notamment respiratoire, a été observée en condition haptique, suggérant une tendance inverse à celle anticipée. Cette augmentation pourrait traduire un niveau d'engagement accru plutôt qu'une réponse physiologique associée au stress. La deuxième série d'hypothèses (H2a, H2b, H2c) examinait la relation entre les variables de charge et la performance. Globalement, les résultats confirment partiellement l'idée selon laquelle une charge élevée réduit la performance. L'effort perçu est significativement associé à une dégradation du contrôle du volant, ce qui soutient H2a pour cette mesure spécifique, bien que les autres indicateurs (vitesse, performance perçue, distance du centre de la voie) ne suivent pas cette tendance de façon uniforme. Concernant la charge cognitive (H2b), seule la contrôle du volant confirme l'hypothèse. L'hypothèse relative au niveau de stress (H2c) n'est pas globalement supportée. Toutefois, un effet marginalement négatif de la fréquence cardiaque sur la performance perçue apparaît, suggérant qu'une augmentation modérée de l'activation physiologique pourrait

être associée à une perception légèrement moins favorable de la performance. Les hypothèses H3 et H4 portaient sur la performance. L'hypothèse H3 proposait que le retour haptique améliore la performance, et donc qu'il constitue un soutien direct à l'exécution de la tâche. Cette hypothèse n'a pas été confirmée : aucun effet significatif du retour haptique n'a été observé sur la performance de conduite ou sur les mesures de rétention d'information. Ensuite, H4 proposait que l'effet du retour haptique sur la charge varie selon la demande multitâche de la tâche. Cette hypothèse n'est pas supportée : les tâches plus complexes en termes de multitâche n'ont pas amplifié ou atténué de manière significative l'effet de l'haptique sur l'effort, la charge cognitive ou le stress. L'hypothèse H5 postulait que l'efficacité multitâche, mesurée via les capacités de multitâche et de la polychronicité, modère la relation entre le retour haptique et les variables de charge. Les analyses n'ont révélé aucun effet significatif, suggérant que l'efficacité multitâche individuelle n'a pas modulé de manière significative la perception de charge en présence du signal haptique. Enfin, l'hypothèse H6 portait sur l'existence d'une interaction triple entre le retour haptique, la demande multitâche et l'efficacité multitâche sur la performance. Les résultats montrent deux effets dignes d'attention. D'abord, un effet marginal entre le score OSPAN et la distance au centre de la voie, suggère que l'haptique pourrait légèrement bénéficier aux individus ayant de meilleures capacités multitâches dans des scénarios complexes. Ensuite, dans une optique exploratoire, un effet significatif de la polychronicité sur la fréquence cardiaque, indique que les individus plus polychrones présentent une moindre activation physiologique sous forte demande multitâche lorsque le retour haptique est présent. Toutefois, la majorité des résultats demeurent non significatifs, conduisant à considérer H6 comme partiellement supportée.

Dans l'ensemble, cette étude montre que le retour haptique n'induit pas une réduction immédiate de la charge cognitive ni une amélioration directe de la performance. Néanmoins, il semble favoriser une implication cognitive accrue et pourrait bénéficier davantage aux individus présentant des compétences multitâches plus élevées dans des situations à forte demande multitâche. Ces conclusions soulignent la pertinence d'étudier davantage les conditions d'efficacité du retour haptique dans les environnements de formation professionnelle.

3.2 Résultats et mise en perspective théorique

Les résultats obtenus montrent qu'en contexte de conduite policière simulée, le retour haptique ne réduit pas significativement l'effort perçu, ni la charge cognitive. Cette absence d'effet direct peut

sembler contre-intuitive au regard de la littérature ayant montré que l'haptique permet de délester les canaux visuel et auditif, souvent saturés en conduite multitâche (Gaffary & Lécuyer, 2018; Meng & Spence, 2015; S. M. Petermeijer, Abbink, & de Winter, 2015). Toutefois, ces travaux s'inscrivent surtout dans des contextes de conduite civile, relativement structurés, alors que la présente étude porte sur des scénarios de formation policière, caractérisés par des exigences attentionnelles plus diffuses et une complexité opérationnelle plus forte. Dans un tel environnement, l'intégration du signal haptique pourrait nécessiter un apprentissage progressif avant de générer un bénéfice perceptible sur la charge.

L'absence d'amélioration de la performance objective doit également être interprétée avec nuance. Selon la théorie de la charge cognitive (Sweller, 1988), l'apprentissage efficace exige une activation mentale suffisante sans dépasser la capacité des ressources disponibles. En ce sens, l'augmentation légère de l'activation physiologique observée en condition haptique, bien que non significative, pourrait témoigner d'un engagement cognitif accru plutôt que d'un stress nuisible. Ce type d'activation contrôlée est cohérent avec le modèle du U inversé de Yerkes et Dodson (1908), selon lequel une stimulation modérée optimise la performance cognitive avant qu'une activation excessive ne conduise à une surcharge (Yerkes & Dodson, 1908).

Par ailleurs, les liens entre charge et performance ne se manifestent que partiellement, ce qui est cohérent avec la théorie de la Multiple Resource Theory (Wickens, 2008). Lorsque l'effort perçu augmente, certaines dimensions de la performance, notamment la stabilité latérale (contrôle du volant), se dégradent, tandis que d'autres, comme la vitesse, peuvent paradoxalement s'améliorer. Ces résultats suggèrent que les participants mobilisent des stratégies de compensation (augmentation de la vitesse, rigidification de la conduite) pour maintenir la tâche principale, au prix d'une diminution de la précision. Cela rejoint les travaux sur la théorie du contrôle compensatoire, selon lesquels l'augmentation de l'effort mental peut entraîner des ajustements comportementaux destinés à préserver la tâche principale, plutôt qu'une baisse globale de performance (Hockey, 1997). En ce qui concerne, l'hypothèse H5, portant sur l'interaction entre retour haptique, demande multitâche et efficacité individuelle, ceci révèle des tendances intéressantes. Les participants ayant une meilleure capacité multitâche (score OSPAN élevé) ou une polychronicité plus marquée semblent tirer un bénéfice marginal du retour haptique lorsqu'ils sont confrontés à une tâche exigeante. Plus précisément, la polychronicité est associée à une

réduction significative de l'activation physiologique (fréquence cardiaque) dans la condition haptique à forte demande multitâche, ce qui suggère une meilleure adaptation émotionnelle et cognitive au retour haptique.

3.2 Implications pratiques

Sur le plan appliqué, les résultats offrent plusieurs pistes pour la conception d'outils de formation policière. Une première implication concerne la manière d'introduire le retour haptique dans les simulateurs. Les observations suggèrent que ce retour vibrocinétique ne devrait pas être pensé comme un signal binaire ou ponctuel, mais plutôt comme un outil intégré dans une logique pédagogique graduelle permettant une appropriation progressive par l'apprenant. Il semble alors pertinent de développer des signaux haptiques adaptatifs, ajustés au niveau d'expertise et à la complexité de la situation. Une telle approche s'inscrit dans les recommandations récentes concernant la conception de systèmes interactifs adaptatifs dans des environnements de conduite ou d'entraînement professionnel (Jeon, 2024). Cela pourrait se faire par l'alignement du retour haptique avec les profils d'apprenants. Les résultats de l'étude suggèrent en effet que les individus présentant une efficacité multitâche plus élevée pourraient tirer davantage de bénéfices du retour haptique. Cette observation ouvre la voie à des approches de personnalisation des interfaces et des signaux perceptifs en fonction des caractéristiques cognitives des apprenants. Dans la formation policière, ce type de personnalisation pourrait contribuer à soutenir la gestion de la charge mentale et à favoriser une meilleure intégration des habiletés multitâches nécessaires à la conduite opérationnelle. Le retour haptique apparaît également particulièrement pertinent pour des scénarios à forte demande cognitive ou impliquant des situations critiques. Dans ces contextes, le canal tactile peut jouer un rôle de réallocation de l'attention sans surcharger les canaux visuel et auditif déjà fortement sollicités en conduite professionnelle. Son intégration dans des scénarios d'urgence, de poursuite ou de coordination radio/terrain pourrait ainsi contribuer à soutenir la stabilité attentionnelle et la réactivité, tout en préservant l'expérience réaliste de la situation et ainsi bonifier la formation. Ainsi, cette étude indique que le retour haptique, même s'il ne réduit pas directement la charge cognitive, ni n'améliore immédiatement la performance de conduite, peut jouer un rôle de facilitateur d'engagement cognitif et de stabilisation physiologique liée au stress, en particulier chez certains profils d'apprenants. Ces résultats invitent donc à concevoir les dispositifs haptiques non pas comme des solutions passives, mais comme des outils adaptatifs

intégrés dans une pédagogie immersive et personnalisée en contexte policier, orientée vers l'apprentissage et le développement des compétences.

3.4 Limites de l'étude

Bien que cette recherche apporte des contributions pertinentes à la compréhension du rôle du retour haptique dans un contexte de conduite policière simulée, certaines limites doivent être prises en considération lors de l'interprétation des résultats.

Premièrement, la taille de l'échantillon ($N=25$) demeure modeste pour des modèles statistiques incluant des effets d'interaction multiples. De plus, la majorité des participants étaient des étudiants en technique policière de première année, n'ayant jamais été exposés au simulateur de conduite auparavant. Ce niveau d'expérience limité pourrait avoir homogénéisé les réponses comportementales et subjectives, réduisant la variabilité interindividuelle nécessaire pour détecter des effets de modulation, notamment ceux liés à l'efficacité multitâche. Il en résulte une généralisation limitée vers des conducteurs policiers expérimentés ou en devenir.

Deuxièmement, les scénarios expérimentaux étaient volontairement courts et standardisés afin de maintenir un contrôle rigoureux sur les conditions expérimentales (T1 et T2 d'une durée fixe, avec ou sans haptique). Cependant, cette brièveté a pu limiter l'apparition d'une surcharge cognitive différenciée entre les tâches. De plus, l'ordre de présentation des conditions constitue une limite potentielle. Il est possible que certains effets observés soient influencés par un phénomène d'apprentissage, d'adaptation ou de familiarisation progressive avec le simulateur plutôt que par les différences de traitement entre les conditions avec ou sans retour haptique. Cet effet d'ordre pourrait avoir atténué ou masqué certaines variations cognitives et comportementales.

Troisièmement, la manipulation du retour haptique reposait uniquement sur une logique dichotomique (présence vs absence), sans variation de ses paramètres essentiels tels que l'intensité de vibration, la localisation corporelle, le timing ou la nature informative (alerte, guidage, correction). Cette approche limite la compréhension fine des dimensions haptiques les plus efficaces dans un contexte d'apprentissage policier. Des dispositifs plus adaptatifs ou progressifs auraient permis de distinguer les effets fonctionnels (guidage, compensation sensorielle) des effets potentiellement intrusifs ou distractifs.

Ces limites ne diminuent pas la portée des résultats, mais en précisent plutôt les conditions d'interprétation. Elles permettent de positionner cette étude comme une étape importante dans l'analyse du retour haptique en formation policière et ouvrent des avenues concrètes pour la poursuite des recherches dans ce domaine.

5. Pistes de recherche futures

Plusieurs avenues de recherche méritent d'être explorées afin de prolonger et d'approfondir les résultats de ce travail. Premièrement, l'une des limites majeures de la présente étude réside dans la durée relativement courte des scénarios de conduite. Des protocoles comportant des tâches plus longues, plus progressives et plus proches des missions opérationnelles permettraient de mieux observer l'apparition d'une surcharge cognitive différenciée, de capter l'évolution de l'effort mental dans le temps et de documenter davantage les effets cumulatifs de la fatigue. L'allongement de la durée des tâches pourrait également favoriser une meilleure sensibilité aux effets du retour haptique sur l'apprentissage moteur et l'autorégulation de l'attention.

Ensuite, la manipulation du retour haptique pourrait être raffinée en adoptant une approche paramétrique. Plutôt qu'une simple condition binaire (présence vs absence), de futures études pourraient varier l'intensité, la localisation ou encore la temporalité du signal haptique (préventif, correctif ou continu). Tester différents signaux haptiques permettrait de mieux identifier celles qui optimisent l'attention sans générer de distraction supplémentaire ou de surcharge sensorielle.

De plus, l'ajout de mesures physiologiques plus fines permettrait de mieux caractériser l'état cognitif et émotionnel des participants. L'intégration d'indicateurs tels que l'électroencéphalographie (EEG), la pupillométrie ou l'activité électrodermale (EDA) offrirait une meilleure compréhension des dynamiques attentionnelles et du stress en temps réel. Ces outils permettraient notamment de distinguer l'activation cognitive adaptative d'un état de surcharge non contrôlée.

Il serait aussi pertinent de reproduire ce type d'expérience auprès d'une population plus représentative de la réalité opérationnelle, soit des aspirants policiers en fin de formation, issus d'écoles professionnelles de police, par exemple, ceux provenant de l'École nationale de police du Québec (ENPQ), ou des agents en service actif. Ces participants possèdent un schéma mental de

la conduite d'urgence, une exposition accrue au stress et des stratégies attentionnelles différentes de celles d'étudiants novices. L'étude dans des conditions réalistes, potentiellement avec des contextes de stress induit (urgence simulée, pression temporelle, enjeux de vie réelle) permettrait de consolider la validité externe des résultats.

Par ailleurs, un prolongement naturel de cette recherche consisterait à examiner l'effet du retour haptique non seulement sur la performance immédiate, mais aussi sur l'apprentissage et la rétention à long terme. Des protocoles longitudinaux, combinant plusieurs sessions d'entraînement sur plusieurs jours ou semaines, permettraient d'évaluer si le retour haptique favorise un apprentissage plus rapide des habiletés de conduite et une meilleure gestion du multitâche dans la durée. De plus, il serait pertinent d'étendre ces investigations à d'autres contextes d'intervention d'urgence, tels que les ambulanciers et les pompiers, afin d'évaluer les effets observés et d'adapter les dispositifs haptiques aux exigences spécifiques de ces environnements opérationnels.

Une autre piste de recherche consiste à étendre l'utilisation du retour haptique à des contextes d'apprentissage de la conduite qui dépassent le cadre policier. Les technologies haptiques pourraient en effet s'avérer pertinentes dans la formation initiale des nouveaux conducteurs, notamment chez les apprentis présentant un niveau de stress élevé ou une faible confiance en leurs capacités derrière le volant. Dans ce type de population, les erreurs sont fréquentes et la crainte de prendre la route peut nuire à l'acquisition progressive des habiletés de conduite. En intégrant un retour tactile informatif dans les simulateurs destinés à l'obtention du permis de conduire, il serait possible de soutenir la régulation attentionnelle et émotionnelle des apprenants, tout en limitant les risques associés à un apprentissage directement en situation réelle. De futures recherches pourraient ainsi examiner la manière dont l'haptique contribue au développement de la confiance en soi, à la réduction de l'anxiété et à la consolidation des comportements de conduite sécuritaires chez les novices.

Bibliographie

- Baelen, D. V., Paassen, M. M. (René) van, Ellerbroek, J., Abbink, D. A., & Mulder, M. (2021). Flying by Feeling : Communicating Flight Envelope Protection through Haptic Feedback. *International Journal of Human-Computer Interaction*. (world).
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10447318.2021.1890489>
- Bazilinskyy, P., Petermeijer, S. M., Petrovych, V., Dodou, D., & de Winter, J. C. F. (2018). Take-over requests in highly automated driving: A crowdsourcing survey on auditory, vibrotactile, and visual displays. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 56, 82-98. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.04.001>
- Bluedorn, A. C., Kalliath, T. J., Strube, M. J., & Martin, G. D. (1999). Polychronicity and the Inventory of Polychronic Values (IPV). *Journal of Managerial Psychology*, 14(3/4), 205-231. <https://doi.org/10.1108/02683949910263747>
- Brookhuis, K. A., & de Waard, D. (2010). Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident; Analysis and Prevention*, 42(3), 898-903. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.06.001>
- Caird, J. K., Johnston, K. A., Willness, C. R., Asbridge, M., & Steel, P. (2014). A meta-analysis of the effects of texting on driving. *Accident; Analysis and Prevention*, 71, 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.005>
- Chang, W., Hwang, W., & Ji, Y. G. (2011). Haptic Seat Interfaces for Driver Information and Warning Systems. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 27(12), 1119-1132. <https://doi.org/10.1080/10447318.2011.555321>

- Collet, C., Clarion, A., Morel, M., Chapon, A., & Petit, C. (2009). Physiological and behavioural changes associated to the management of secondary tasks while driving. *Applied Ergonomics*, 40(6), 1041-1046. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.01.007>
- Conway, A. R. A., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O., & Engle, R. W. (2005). Working memory span tasks : A methodological review and user's guide. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(5), 769-786. <https://doi.org/10.3758/bf03196772>
- ENPQ. (s. d.). Consulté 29 septembre 2025, à l'adresse <https://www.enpq.qc.ca/futur-policier/etapes-dadmission/contingentement>
- Gaffary, Y., & Lécuyer, A. (2018). The Use of Haptic and Tactile Information in the Car to Improve Driving Safety : A Review of Current Technologies. *Frontiers in ICT*, 5. <https://doi.org/10.3389/fict.2018.00005>
- Grassmann, M., Vlemincx, E., von Leupoldt, A., Mittelstädt, J. M., & Van den Bergh, O. (2016). Respiratory Changes in Response to Cognitive Load : A Systematic Review. *Neural Plasticity*, 2016, 8146809. <https://doi.org/10.1155/2016/8146809>
- Guo, Y., Wang, Y., Tong, Q., Shan, B., He, L., Zhang, Y., & Wang, D. (2024). Active electronic skin : An interface towards ambient haptic feedback on physical surfaces. *Npj Flexible Electronics*, 8(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s41528-024-00311-5>
- Guru, K. A., Shafiei, S. B., Khan, A., Hussein, A. A., Sharif, M., & Esfahani, E. T. (2015). Understanding Cognitive Performance During Robot-Assisted Surgery. *Urology*, 86(4), 751-757. <https://doi.org/10.1016/j.urology.2015.07.028>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of Empirical and Theoretical Research. Dans P. A. Hancock & N. Meshkati (Éds.),

- Advances in Psychology* (Vol. 52, p. 139-183). North-Holland.
[https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hidalgo-Muñoz, A. R., Béquet, A. J., Astier-Juvenon, M., Pépin, G., Fort, A., Jallais, C., Tattegrain, H., & Gabaude, C. (2019). Respiration and Heart Rate Modulation Due to Competing Cognitive Tasks While Driving. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00525>
- Ho, C., Tan, H. Z., & Spence, C. (2006). The differential effect of vibrotactile and auditory cues on visual spatial attention. *Ergonomics*, 49(7), 724-738.
<https://doi.org/10.1080/00140130600589887>
- Hockey, G. R. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload; a cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45(1-3), 73-93. [https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(96\)05223-4](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(96)05223-4)
- Horrey, W. J., & Wickens, C. D. (2006). Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques. *Human Factors*, 48(1), 196-205.
<https://doi.org/10.1518/001872006776412135>
- Jeon, M. (2024). The Effects of Emotions on Trust in Human-Computer Interaction : A Survey and Prospect. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 40(22), 6864-6882.
<https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2261727>
- Luo, R., Weng, Y., Wang, Y., Jayakumar, P., Brudnak, M. J., Paul, V., Desaraju, V. R., Stein, J. L., Ersal, T., & Yang, X. J. (2021). A workload adaptive haptic shared control scheme for semi-autonomous driving. *Accident Analysis & Prevention*, 152, 105968.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105968>

- Luo, Y.-F., Kang, S., Yang, S., & Lu, C. (2023). The relationships among Taiwanese youth's polychronicity, multitasking behavior and perceived learning performance in online learning. *Frontiers in Psychology*, 14, 1131765. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1131765>
- Matthews, G., Reinerman-Jones, L. E., Barber, D. J., & Abich, J. (2015). The psychometrics of mental workload : Multiple measures are sensitive but divergent. *Human Factors*, 57(1), 125-143. <https://doi.org/10.1177/0018720814539505>
- Mehler, B., Reimer, B., & Coughlin, J. F. (2010). Physiological Reactivity to Graded Levels of Cognitive Workload across Three Age Groups : An On-Road Evaluation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 54(24), 2062-2066. <https://doi.org/10.1177/154193121005402409>
- Meng, F., & Spence, C. (2015). Tactile warning signals for in-vehicle systems. *Accident; Analysis and Prevention*, 75, 333-346. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.12.013>
- Nadj, M., Rißler, R., Adam, M., Knierim, M., Li, M., Maedche, A., & Riedl, R. (2023). What Disrupts Flow in Office Work? The Impact of Frequency and Relevance of IT-Mediated Interruptions. *MIS Quarterly*, 47, 1615-1646. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2023/17200>
- Neale, V., Dingus, T., Klauer, S., & Sudweeks, J. (2005). An overview of the 100-car naturalistic study and findings. *Proc. Int. Tech. Conf. Enhanced Safety Vehicles*, 19.
- Office québécois de la langue française. (s. d.). *Conduite préventive*. Consulté 10 novembre 2025, à l'adresse <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/2070369/conduite-preventive>
- Okamura, A. M. (2009). Haptic Feedback in Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery. *Current opinion in urology*, 19(1), 102-107. <https://doi.org/10.1097/MOU.0b013e32831a478c>

- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2004). Cognitive Load Theory : Instructional Implications of the Interaction between Information Structures and Cognitive Architecture. *Instructional Science*, 32, 1-8. <https://doi.org/10.1023/B:TRUC.0000021806.17516.d0>
- Park, J., Wozniak, D., & Zahabi, M. (2024). Modeling novice law enforcement officers' interaction with in-vehicle technology. *Applied Ergonomics*, 114, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.104154>
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks : Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116(2), 220-244. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.116.2.220>
- Petermeijer, S., Abbink, D., & de Winter, J. (2014). Should Drivers Be Operating Within an Automation-Free Bandwidth? Evaluating Haptic Steering Support Systems With Different Levels of Authority. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 57, 5-20. <https://doi.org/10.1177/0018720814563602>
- Petermeijer, S. M., Abbink, D. A., Mulder, M., & de Winter, J. C. F. (2015). The Effect of Haptic Support Systems on Driver Performance : A Literature Survey. *IEEE Transactions on Haptics*, 8(4), 467-479. <https://doi.org/10.1109/TOH.2015.2437871>
- Pietra, A., Vazquez Rull, M., Etzi, R., Gallace, A., Scurati, G. W., Ferrise, F., & Bordegoni, M. (2021). Promoting eco-driving behavior through multisensory stimulation : A preliminary study on the use of visual and haptic feedback in a virtual reality driving simulator. *Virtual Reality*, 25(4), 945-959. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00499-1>
- SAAQ. (2024). *Bilan routier 2021 : Baisse du nombre de personnes accidentées de 18,0 % par rapport à la moyenne de 2016 à 2020.* SAAQ. <https://saaq.gouv.qc.ca/saaq/documentation/bilan-routier>

- Salvucci, D. D., & Taatgen, N. A. (2008). Threaded cognition : An integrated theory of concurrent multitasking. *Psychological Review*, 115(1), 101-130. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.115.1.101>
- Salvucci, D. D., & Taatgen, N. A. (2011). *The multitasking mind*. Oxford University Press. [https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=YE-anWg_nNsC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Salvucci,+D.+D.,+%26+Taatgen,+N.+A.+\(2011\).+The+multitasking+mind.+Oxford+University+Press.&ots=R5yZnCS5da&sig=u5dl4pJAQe2VWiYUFukKUKU_a7Y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=YE-anWg_nNsC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Salvucci,+D.+D.,+%26+Taatgen,+N.+A.+(2011).+The+multitasking+mind.+Oxford+University+Press.&ots=R5yZnCS5da&sig=u5dl4pJAQe2VWiYUFukKUKU_a7Y#v=onepage&q&f=false)
- Sanders, T., Williams, C., & Carruth, D. (2012). *Sources of Cognitive Load in a Simulated Law Enforcement Patrol Task*.
- Strayer, D. L., & Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction : Dual-Task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone. *Psychological Science*, 12(6), 462-466. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00386>
- Sun, B., Shan, Y., Wu, G., Zhao, S., & Xie, F. (2024). Personalized Shared Control for Automated Vehicles Considering Driving Capability and Styles. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(24), 7904. <https://doi.org/10.3390/s24247904>
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Tijerina, L., Johnston, S., Parmer, E., Pham, H. A., Winterbottom, M. D., & Barickman, F. S. (2000, septembre 1). *Preliminary Studies in Haptic Displays for Rear-End Collision Avoidance System and Adaptive Cruise Control System Applications*. <https://rosap.ntl.bts.gov>

Transports Canada. (2025, mai 15). *Statistiques sur les collisions de la route au Canada : 2023*.

Transports Canada. <https://tc.canada.ca/fr/transport-routier/statistiques-donnees/statistiques-collisions-route-canada/2023/statistiques-collisions-route-canada-2023>

Turner, M. L., & Engle, R. W. (1989). Is working memory capacity task dependent? *Journal of Memory and Language*, 28(2), 127-154. [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(89\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0749-596X(89)90040-5)

Unsworth, N., Heitz, R., Schrock, C., & Engle, R. (2005). An automated version of the Operation Span task. *Behavior research methods*, 37, 498-505. <https://doi.org/10.3758/BF03192720>

Villar, R., Beltrame, T., & Hughson, R. L. (2015). Validation of the Hexoskin wearable vest during lying, sitting, standing, and walking activities. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme*, 40(10), 1019-1024. <https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0140>

Wang, G., Wang, H.-H., & Ren, G. (2024). Visual and Haptic Guidance for Enhancing Target Search Performance in Dual-Task Settings. *Applied Sciences*, 14, 4650. <https://doi.org/10.3390/app14114650>

Watson, J. M., & Strayer, D. L. (2010). Supertaskers : Profiles in extraordinary multitasking ability. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(4), 479-485. <https://doi.org/10.3758/PBR.17.4.479>

Weng, Y., Luo, R., Jayakumar, P., Brudnak, M. J., Paul, V., Desaraju, V. R., Stein, J. L., Yang, X. J., & Ersal, T. (2020). Design and Evaluation of a Workload-Adaptive Haptic Shared Control Framework for Semi-Autonomous Driving. *2020 American Control Conference (ACC)*, 4369-4374. <https://doi.org/10.23919/ACC45564.2020.9147482>

- Wickens, C. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human factors*, 50, 449-455.
<https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
- Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18(5), 459-482.
<https://doi.org/10.1002/cne.920180503>
- Yurko, Y. Y., Scerbo, M. W., Prabhu, A. S., Acker, C. E., & Stefanidis, D. (2010). Higher mental workload is associated with poorer laparoscopic performance as measured by the NASA-TLX tool. *Simulation in Healthcare: Journal of the Society for Simulation in Healthcare*, 5(5), 267-271. <https://doi.org/10.1097/SIH.0b013e3181e3f329>
- Zahabi, M., Nasr, V., Mohammed Abdul Razak, A., Patranella, B., McCanless, L., & Maredia, A. (2023). Effect of Secondary Tasks on Police Officer Cognitive Workload and Performance Under Normal and Pursuit Driving Situations. *Human Factors*, 65(5), 809-822.
<https://doi.org/10.1177/00187208211010956>

Annexes

Annexe A – Description des tâches supplémentaires (T3 à T7)

T3 – Slalom en conduite libre (avec ou sans haptique, 3 minutes)

Cette tâche visait à évaluer la précision et la constance du contrôle latéral du véhicule. Le participant devait zigzaguer à travers un parcours de type « serpentín », reproduisant une série de virages serrés successifs. L'objectif était de parcourir la plus grande distance possible dans la durée impartie, tout en minimisant les écarts de trajectoire et les erreurs de contrôle. Cette tâche sollicitait particulièrement la coordination motrice et la gestion fine de la direction.

T4 – Manœuvres de conduite (avec ou sans haptique, durée contrôlée)

Cette tâche avait pour but d'évaluer la capacité des participants à exécuter des manœuvres de précision. Trois manœuvres de conduite étaient demandées : (i) un stationnement parallèle, (ii) un virage en U, et (iii) un stationnement en marche arrière. Chaque manœuvre pouvait être tentée à trois reprises, ce qui permettait de standardiser la durée de la tâche tout en contrôlant le niveau de difficulté. La performance était mesurée en fonction du nombre de tentatives nécessaires et de la précision de l'exécution.

T5 – Réflexes face à des scénarios inattendus (avec ou sans haptique, durée variable selon essais)

Cette tâche regroupait trois scénarios indépendants, chacun destiné à tester la réactivité des participants face à des événements imprévus :

1. **Intersections** : conduite en milieu urbain avec apparition soudaine d'un obstacle (piéton, autobus, cycliste ou véhicule). Le premier essai servait de pratique, tandis que le second constituait le test effectif.
2. **Piétons** : conduite guidée en ville où des piétons surgissaient de manière inattendue, obligeant le participant à freiner rapidement. Deux répétitions de ce scénario étaient prévues.
3. **Autoroute** : conduite sur autoroute avec apparition subite d'un chevreuil sur la voie, demandant une manœuvre d'évitement ou un freinage brusque.

Cette tâche évaluait la rapidité et l'efficacité des réactions face à des situations de danger potentiel.

T6 – Rallye en montagne sous la pluie (avec ou sans haptique, durée limitée)

Dans cette tâche, le participant devait conduire sur une route de montagne en gravier par temps de pluie. L'objectif consistait à collecter trois drapeaux parmi dix répartis le long du parcours. Cette tâche combinait des défis de navigation, de vitesse et de précision dans un environnement instable et glissant. La performance était mesurée en fonction du nombre de drapeaux collectés et de la maîtrise du véhicule dans des conditions routières difficiles.

T7 – Rallye en montagne enneigée (avec ou sans haptique, durée limitée)

Cette tâche reprenait la même logique que T6, mais dans un contexte de route enneigée. Le participant devait également collecter trois drapeaux parmi dix positionnés sur la carte. La surface enneigée ajoutait une difficulté supplémentaire en augmentant la perte d'adhérence et en exigeant un contrôle plus rigoureux de la vitesse et de la trajectoire. Cette tâche visait à évaluer la capacité d'adaptation à des conditions routières hivernales extrêmes.

Annexe B : Déroulement de l'expérience complète

ACCUEIL ET INSTALLATION (15 min.)



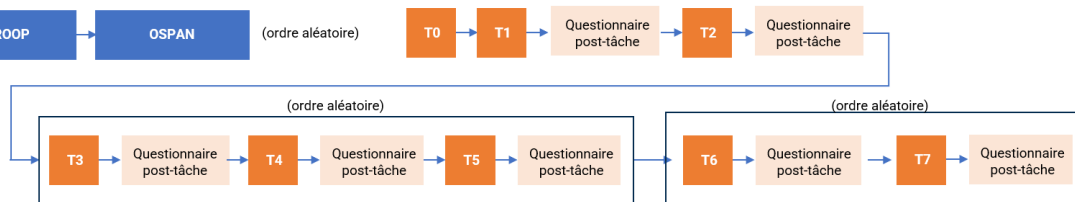
TEST UTILISATEUR (60 min.)

BLOC A (max 15 min)



(ordre aléatoire)

BLOC B (max 45 min)



ENTREVUE ET CONCLUSION (15 min.)



Annexe C : Échelles de mesure

Construit	Nom de l'échelle de mesure	Type de mesure	Échelles d'items	Options de réponse	Référence
Charge cognitive	NASA TLX	Auto-reporté	1. Dans quelle mesure la tâche a-t-elle été mentalement exigeante ? 2. Dans quelle mesure la tâche a-t-elle été physiquement exigeante ? 3. À quel point vous êtes-vous senti(e) pressé(e) durant la tâche ? 4. Dans quelle mesure avez-vous réussi à accomplir ce qu'on vous a demandé ? 5. À quel point avez-vous dû fournir des efforts pour atteindre votre niveau de performance ? 6. À quel point vous êtes-vous senti(e) incertain(e), découragé(e), irrité(e), stressé(e) et agacé(e) ?	Percentage Slider: 0 = Low 100 = High	Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. <i>Advances in Psychology</i> , 52, 139-183.
Effort perçu	NASA TLX	Auto-reporté	À quel point avez-vous dû fournir des efforts pour atteindre votre niveau de performance ?	Percentage Slider: 0 = Low 100 = High	Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. <i>Advances in Psychology</i> , 52, 139-183.
Polychronicité	Polychronic Attitude Index (PAI)	Auto-reporté	1. J'aime accomplir plusieurs tâches en même temps. 2. Je préfère travailler sur plusieurs projets simultanément plutôt que de me concentrer sur un seul. 3. Lorsque je travaille sur une tâche, j'aime m'interrompre pour en accomplir d'autres. 4. Je trouve stimulant de jongler entre plusieurs tâches en même temps. 5. Je pense être plus productif(ve) lorsque je réalise plusieurs activités à la fois. 6. J'ai tendance à diviser mon temps entre différentes tâches au lieu de me focaliser sur une seule. 7. Dans mon travail quotidien, je passe fréquemment d'une tâche à l'autre. 8. Je me sens mal à l'aise lorsque je dois me concentrer sur une seule tâche à la fois. 9. J'ai l'habitude d'interrompre une activité pour en commencer une autre. 10. Il est normal pour moi de gérer plusieurs tâches en parallèle.	Échelle de Likert 1 (Pas du tout d'accord) à 7 (Tout à fait d'accord)	Bluedorn, A. C., Kalliath, T. J., Strube, M. J., & Martin, G. D. (1999). "Polychronicity and the inventory of polychronic values (IPV)." <i>Journal of Managerial Psychology</i> , 14(3/4), 205-231.

Performance perçue	Pperf	Auto-reporté	1.Comment évalueriez-vous votre performance dans la tâche sur le simulateur ? 2.Si vous deviez noter votre performance dans la tâche sur le simulateur, quelle note vous donneriez-vous ? 3.Comparé(e) aux autres, comment pensez-vous avoir accompli cette tâche ?	Échelle de Likert 1 (Extrêmement mauvaise) à 7 (Extrêmement bonne) Échelle de Likert 1 (Performance très faible à la moyenne) à 7 (Performance très supérieure à la moyenne)	Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. <i>Advances in Psychology</i> , 52, 139-183.
Performance sur simulateur	Speed Steering DistToCenter	Télémétrie et observations	Mesures et métriques de performance analysées: -Vitesse -Contrôle du volant -Distance du centre de la voie	-	Télémétrie et observations
Âge	age	Auto-reporté	Quel âge avez-vous?	1-100	Tech3lab (2025)
Profil d'étude	Profile	Auto-reporté	Vous êtes étudiant(e) en techniques policières. Dans quelle année êtes-vous ?	1ère année 2e année 3e année AEC	Tech3lab (2025)
Genre	Genre	Auto-reporté	À quel genre vous identifiez-vous?	Homme Femme Non-binaire Autre	Tech3lab (2025)
Expérience en simulation	Exp_Sim	Auto-reporté	Avez-vous déjà utilisé un simulateur de conduite ?	Non. Si oui, lequel ? (Réponse libre.)	Tech3lab (2025)
Expérience en conduite	Exp_cond	Auto-reporté	1. Depuis combien de temps conduisez-vous régulièrement ? 2. Combien d'heures par semaine passez-vous à conduire en moyenne ? 3. Dans quelle mesure vous considérez-vous comme un conducteur expérimenté ?	Question 1 et 2 : Réponse ouverte ou intervalle de temps (ex. moins d'un an, 1-3 ans, 3-5 ans, etc.) Question 3 : Échelle de Likert de 1 (Très inexpérimenté) à 7 (Très expérimenté)	Tech3lab (2025)