

[Page de garde]

HEC MONTRÉAL

**Régulation émotionnelle et retour haptique :
effets sur la performance en simulation de conduite**

Par

Alice Gambaro

Constantinos K. Coursaris

HEC Montréal

Codirecteur de recherche

Ruxandra Monica Luca

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)*

Janvier 2026

©Alice Gambaro, 2026



Comité d'éthique de la recherche

Le 31 mars 2025

À l'attention de : Pierre-Majorique Léger, HEC Montréal

Objet : Approbation éthique de votre projet de recherche

Projet : 2025-6406

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

Source de financement : R2882B (CRSNG), R2882C (Prompt), R2882 (partenaires industriels, dont D-Box
Titre de la subvention : ALLRP 575332 - 22 Alliance Grants (ALLRP), project entitled "Improving industrial UX measures and methods", with Vidéotron ltée, PROMPT, D-Box Technologies Inc., Deloitte, Sobeys Inc., Allô prof, Mouvement des Caisses Pop Desjardins, ServiceNow, Blue Yonder Group Inc.

Bonjour Pierre-Majorique Léger,

Votre projet de recherche a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains par le CER de HEC Montréal.

Un certificat d'approbation éthique qui atteste de la conformité de votre projet de recherche à la *Politique relative à l'éthique de la recherche avec des êtres humains* de HEC Montréal est émis en date du 31 mars 2025. Prenez note que ce certificat est **valide jusqu'au 01 mars 2026**.

Vous devrez obtenir le renouvellement de votre approbation éthique avant l'expiration de ce certificat à l'aide du formulaire *F7 - Renouvellement annuel*. Un rappel automatique vous sera envoyé par courriel quelques semaines avant l'échéance de votre certificat.

Si des modifications sont apportées à votre projet, vous devrez remplir le formulaire *F8 - Modification de projet* et obtenir l'approbation du CER avant de mettre en œuvre ces modifications.

Notez qu'en vertu de la *Politique relative à l'éthique de la recherche avec des êtres humains* de HEC Montréal, il est de la responsabilité des chercheurs d'assurer que leurs projets de recherche conservent une approbation éthique pour toute la durée des travaux de recherche et d'informer le CER de la fin de ceux-ci. De plus, toutes modifications significatives du projet doivent être transmises au CER avant leurs applications.

Lorsque votre projet est terminé, vous devrez remplir le formulaire *F9 - Fin de projet (ou F9a - Fin de projet étudiant sous l'égide d'un autre chercheur)*, selon le cas. **Les étudiants doivent remplir un formulaire F9 afin de recevoir l'attestation d'approbation éthique nécessaire au dépôt de leur thèse/mémoire/projet supervisé.**

Vous pouvez dès maintenant procéder à la collecte de données pour laquelle vous avez obtenu ce certificat.

Nous vous souhaitons bon succès dans la réalisation de votre recherche.

Le CER de HEC Montréal

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 Briegne; 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

Aujourd'hui, le retour haptique est de plus en plus intégré dans les simulateurs de conduite pour améliorer le réalisme et l'efficacité des formations. Toutefois, dans un contexte où la sécurité routière devient un enjeu majeur, il est essentiel de comprendre comment cette technologie influence la performance des conducteurs. Plusieurs travaux soulignent que l'inhibition émotionnelle inconsciente, la charge cognitive et la régulation émotionnelle consciente pourraient jouer un rôle important. Cependant, les effets restent incompris et peu étudiés, créant un véritable manque de connaissances pour les formateurs et chercheurs.

Ainsi, ce mémoire s'appuie sur plusieurs théories et travaux, montrant que ces différents mécanismes émotionnels et cognitifs peuvent individuellement avoir un effet sur la performance des conducteurs, pour ensuite examiner leur effet conjoint. De ce fait, cette étude vise à répondre à la question suivante : *dans quelle mesure l'inhibition émotionnelle, la charge cognitive et la régulation émotionnelle modèrent-elles l'effet du retour haptique sur la performance en simulation de conduite automobile ?*

A travers une étude expérimentale menée auprès d'un échantillon de 25 participants, ce mémoire évalue ces effets dans trois tâches de conduite distinctes, chacune administrée avec ou sans haptique. Les données ont été collectées grâce à des questionnaires, un test comportemental et directement depuis le simulateur, puis traitées et analysées statistiquement dans SAS Studio.

Les résultats indiquent une forte influence de ces trois notions, mais différemment entre les contextes de conduite, où les effets peuvent même s'inverser. Plus spécifiquement, les analyses soulignent que le retour haptique peut être à la fois une aide ou un inconvénient suivant le profil et le contexte.

En mobilisant la théorie de James-Lange, de la charge cognitive et de la régulation émotionnelle, cette étude développe la compréhension du rôle du retour haptique dans la sécurité routière à travers une vision plus personnalisée. Elle ouvre ainsi la voie à une approche des conceptions de formations plus centrée sur l'humain, et contribue également à partager de nouvelles pistes d'exploration pour approfondir l'étude de l'interaction humain-technologie, plus spécifiquement en simulation.

Mots clés : Simulation, Conduite, Haptique, Personnalisation, Régulation émotionnelle, Charge cognitive, Performance

Table des matières

Liste des tableaux.....	ii
Liste des figures	iii
Liste des abréviations et acronymes	iv
Avant-propos.....	vi
Remerciements.....	vii
Chapitre 1 – Introduction.....	1
1. Contexte de recherche.....	1
2. Connaissances et cadres théoriques	2
3. Enjeux de recherche.....	3
4. Approche méthodologique.....	4
5. Contribution	4
6. Structure du mémoire.....	5
Références.....	6
Chapitre 2 – Article scientifique	10
Résumé.....	10
1. Introduction.....	11
2. Etat de l’art : retour haptique, intensité émotionnelle et performance.....	13
2.1 Effet du retour haptique sur l’intensité émotionnelle	13
2.2 Rôle modérateur de l’inhibition émotionnelle et de la charge cognitive	15
2.3 Effet de l’intensité émotionnelle sur la performance	18
3. Méthodologie	21
3.1 Participants.....	21
3.2 Design expérimental	21
3.3 Tâches	22
3.4 Contexte expérimental	24
3.5 Procédure	26

3.6	Mesures générales	27
3.7	Mesures de performance réelle	29
3.8	Préparation des données.....	31
3.9	Préparation des analyses	31
4.	Résultats.....	32
4.1	Statistique descriptive	32
4.2	Tests d’hypothèse.....	35
4.3	Synthèse des résultats statistiques.....	42
4.4	Synthèse des résultats comportementaux.....	43
5.	Discussion	44
5.1	Résumé des résultats	44
5.2	Implications théoriques	45
5.3	Implications managériales	49
5.4	Limites et pistes futures	50
6.	Conclusion	51
	Références.....	52
	Annexes.....	58
	Annexe A. Items de Nasa-TLX et Affective Slider	58
	Annexe B. Photographies des tâches	59
	Annexe C. Validité des résultats.....	60
	Chapitre 3 – Conclusion.....	65
1.	Rappel de la question de recherche et synthèse des résultats principaux	65
2.	Contribution scientifique et pratique	65
3.	Limites et perspectives.....	66
4.	Conclusion finale	67
	Bibliographie.....	69
	Déclaration d’utilisation de l’intelligence artificielle générative.....	77

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1. Contribution personnelle aux étapes de la recherche

Chapitre 2

Tableau 2. Appellation des tâches

Tableau 3. Nature et opérationnalisation des variables

Tableau 4. Items de performance perçue

Tableau 5. Items d'ERQ

Tableau 6. Mesures de performance réelle issues du simulateur

Tableau 7. Statistiques descriptives des variables d'intérêt

Tableau 8. Synthèse des résultats significatifs par tâche

Tableau 9. Synthèse des résultats comportementaux par tâche

Liste des figures

Chapitre 2

Figure 1. Modèle de recherche

Figure 2. Visuel de la tâche de Stroop Emotionnelle

Figure 3. Photographies du simulateur

Figure 4. Schéma de l'aménagement de la salle de simulation

Figure 5. Effet modérateur de l'inhibition émotionnelle sur la relation entre le retour haptique et la valence en T2

Figure 6. Effet modérateur de l'inhibition émotionnelle sur la relation entre le retour haptique et l'activation en T2 et T3

Figure 7. Effet modérateur de la charge cognitive sur la relation entre le retour haptique et l'activation en T1

Figure 8. Effet modérateur de la réévaluation émotionnelle sur la relation entre la valence et l'angle du volant en T1

Figure 9. Effet modérateur de la réévaluation émotionnelle sur la relation entre la valence et la vitesse en T2

Figure 10. Effet modérateur de la réévaluation émotionnelle sur la relation entre la valence et DTCV en T2

Figure 11. Modèle de recherche validé, montrant les effets les plus forts pour les relations testées

Liste des abréviations et acronymes

Concepts

HCI – Human-Computer Interaction

NRDT – Non-Driving Related Tasks

Tâches

T1 - Tâche de conduite régulière.

T2 - Tâche de conduite multitâche.

T3 - Tâche de conduite en slaloms.

Mesures de performance

DTCV - Distance par rapport au centre de la voie centre de la voie

Avant-propos

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre du programme de Maîtrise ès sciences de la gestion (M.Sc.) de HEC Montréal, dans la spécialisation en expérience utilisateur (UX).

L'approbation de la direction administrative et des codirecteurs a été obtenue pour le choix de structure adoptée, incluant un article scientifique. Les coauteurs de ce dernier ont donné leur accord pour sa préparation en vue d'une soumission auprès du *International Journal of Human-Computer Interaction*.

Le projet de recherche associé à ce mémoire a obtenu l'approbation du Comité d'éthique de la recherche (CER) le 31 mars 2025 (numéro de certification : 2025-6406).

Remerciements

Tout d’abord, je souhaite remercier le Tech3Lab pour m’avoir permis de participer à la recherche partenaire liée à ce projet extrêmement enrichissant dans le cadre de ma maîtrise. J’ai toujours voulu apprendre en continu tout au long de ma vie, et cette opportunité m’a permis de terminer mes études dans cette dynamique. Je remercie également les entreprises partenaires du projet, pour leur collaboration et leur soutien. Je tiens aussi à exprimer ma gratitude au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et Prompt pour la bourse ayant rendu ce projet possible.

Je remercie ensuite mes superviseurs, Ruxandra Monica Luca et Constantinos K. Coursaris, dont l’encouragement et la disponibilité m’ont guidé tout au long de la rédaction de ce mémoire. Leurs conseils m’ont permis de me dépasser et d’atteindre un résultat dont je suis fière. Un grand merci aussi à Sylvain Sénécal et Pierre-Majorique Léger, dont l’empathie et l’expertise m’ont permis d’apprendre à voir le UX d’un nouvel œil. Je souhaite également remercier Shang-Lin Chen, dont l’efficacité et la rigueur ont continué de m’impressionner tout au long de la phase d’analyse.

Une pensée particulière à ma partenaire de recherche. Nos ressemblances ont fait naître une amitié qui nous a permis d’avancer de façon chaleureuse et bienveillante, et nos différences ont créé une complémentarité qui a porté efficacement notre projet.

Je suis particulièrement reconnaissante envers mes parents pour leur écoute, leur curiosité, leur humour et (surtout) la confiance qu’ils ont en moi, même à 5000 km de distance. Je remercie aussi ma famille, mes proches et mes amis, qui ont été présents depuis le Canada, la France, la Suisse et l’Italie. Leur présence a fait toute la différence.

Enfin, j’aimerais remercier mes deux amies proches du programme, avec qui j’ai adoré rire et partager tous ces moments au laboratoire, en cours et en dehors. Leur rencontre a rendu cette expérience particulièrement chère à mon cœur.

Chapitre 1 – Introduction

1. Contexte de recherche

En mai 2025, le Forum international des transports réunissait les ministres de 69 pays pour échanger au sujet des enjeux de sécurité routière dans le monde (World Health Organization, 2025). Cet événement s'inscrit dans une tendance déjà abordée par certaines institutions, qui expliquent que les accidents de la route causent en moyenne 1,19 million de décès par année (World Health Organization, 2023). Face à ces constats humains critiques, les Nations Unies ont mis en place la « Vision Zéro », qui consiste à reconnaître l'erreur humaine pour établir une stratégie efficace et diviser ce chiffre de moitié d'ici 2030 (Association canadienne des professionnels de la sécurité routière, 2025 ; WHO, 2023). Bien que plusieurs mesures soient mises en place sur le plan environnemental en agissant sur l'aménagement des espaces routiers, de nombreux pays et régions soulignent le besoin de développement sur le plan humain (United Nations Department of Safety and Security, 2019; Gouvernement du Québec, ministère des Transports et de la Mobilité durable, 2023; European Transport Safety Council, 2025). Ainsi, au-delà des interventions en matière d'infrastructures, la formation représente un levier essentiel pour améliorer la sécurité routière.

Dans cette optique, les simulateurs sont devenus des outils indispensables pour développer les compétences des individus dans un environnement contrôlé et sans risques (Campos et al., 2017). Apparus dans les années 1940, leur technologie est progressivement devenue accessible à une grande variété de profils, allant des apprentis conducteurs en auto-école (Alonso et al., 2023) aux professionnels en services d'intervention urgente (Hoyt, 2019; Prohn & Herbig, 2022). Dans ce contexte d'utilisation diversifiée, la présente recherche se focalise sur la formation de conducteurs professionnels, plus particulièrement des étudiants en techniques policières, amenés à intervenir dans des situations exigeantes. Cette adoption étendue des simulateurs s'explique notamment par leur avantage à la fois économique et pédagogique : ils peuvent contribuer à réduire certains coûts, comme la maintenance de vrais véhicules (Hoyt, 2019), mais permettent également aux responsables de formation d'observer la conduite des apprenants sans risques réels (Pietra et al., 2021). Plusieurs travaux soulignent également leur efficacité dans l'amélioration des comportements de conduite. Par exemple, leur inclusion dans les formations des services d'urgence de New York a contribué à réduire le nombre de

collisions aux intersections de 75% entre 2007 et 2010 (Hoyt, 2019). Pour toutes ces raisons, ils occupent aujourd'hui une place centrale dans la formation de conduite (Alonso et al., 2023). C'est pourquoi il devient essentiel de comprendre comment leurs caractéristiques technologiques impactent l'apprentissage et la performance des conducteurs.

2. Connaissances et cadres théoriques

Dans cette optique, plusieurs chercheurs s'intéressent à la manière dont les fonctionnalités technologiques peuvent influencer la perception des informations transmises par les simulateurs (Benloucif et al., 2019). Parmi elles, le retour haptique occupe une place centrale : il regroupe un ensemble de vibrations et de mouvements ajoutés pour accroître le réalisme de l'expérience, et peut contribuer à améliorer la conduite quand il est bien calibré (Pietra et al., 2021; Alonso et al., 2023; Benloucif et al., 2019; Huo et al., 2024). En revanche, une mauvaise synchronisation peut provoquer l'effet inverse (Rego & Montague, 2023). En contexte d'apprentissage, cette nuance devient donc cruciale, car une calibration adaptée peut faire toute la différence entre une formation efficace ou contre-productive.

Dans cette perspective, plusieurs études ont examiné les réactions et mécanismes psychologiques associés au retour haptique, montrant notamment qu'il peut influencer l'intensité émotionnelle des conducteurs (Huo et al., 2024). La théorie de James-Lange (1884/1994) fournit une première explication, indiquant que les émotions découlent directement de la perception et de l'interprétation des changements corporels. Dans un simulateur, les mouvements et vibrations du retour haptique vont donc au-delà d'une fonctionnalité technique, et deviennent une source de signaux émotionnels plus ou moins rassurants ou stressants selon les individus.

Ces réactions émotionnelles peuvent également avoir des conséquences sur la performance de conduite simulée. Par exemple, Jeon et al. (2014) ont constaté qu'un conducteur stressé ou contrarié pouvait réagir plus brusquement et augmenter son risque de collisions. Toutefois, ces effets sont très hétérogènes selon le contexte et les profils (Liu et al., 2025), et peuvent dépendre d'autres facteurs, notamment la charge cognitive, qui renvoie à la quantité d'informations que l'individu peut gérer. La théorie associée explique que cette quantité est limitée et qu'une fois dépassée, l'attention et la capacité d'adaptation de l'individu sont réduites. En contexte de simulation de conduite, cela peut ensuite se traduire par une mauvaise gestion des distractions de la route (Huo et al., 2024; Paas & Sweller, 2012; Sweller, 1988).

En somme, le retour haptique semble lié à plusieurs facteurs, tels que la calibration, l'intensité émotionnelle des individus et leur niveau de charge cognitive. Dans l'ensemble, les théories et travaux suggèrent que le retour haptique peut ainsi influencer la performance à la fois directement, et par le biais de ces mécanismes émotionnels et cognitifs. Cependant, l'interaction entre ces processus reste mal comprise.

3. Enjeux de recherche

Malgré ces avancées et l'intérêt croissant à leur sujet, trois lacunes importantes soulèvent encore des questionnements. Premièrement, l'effet du retour haptique sur la performance demeure inconstant selon les contextes (Béquet, 2023; Shin & Kim, 2021). La littérature souligne ainsi la nécessité de varier et de distinguer les tâches pour saisir plus clairement le rôle du retour haptique, les conditions dans lesquelles il améliore ou détériore la performance restant encore floues (Rego & Montague, 2023).

Deuxièmement, nous en savons peu sur la manière dont les conducteurs gèrent à la fois consciemment et inconsciemment leurs émotions face au retour haptique en simulation de conduite (Braun et al., 2022). Ces mécanismes sont pourtant essentiels dans un contexte comme celui-ci, qui demande une régulation constante des émotions pour s'adapter à la fois au retour haptique et aux événements routiers, tout en maintenant la concentration, le contrôle et la sécurité. La littérature distingue déjà plusieurs types de stratégies de gestion émotionnelle : les stratégies conscientes, abordées par la théorie de la régulation émotionnelle (Gross, 1998), et les stratégies inconscientes, dont les études sont encore émergentes (Messerotti Benvenuti et al., 2015). Plusieurs concepts existent pour définir cette dernière notion, mais tous se rejoignent autour d'une idée commune : l'inhibition émotionnelle inconsciente (Rincón-Pérez et al., 2025; Yao & Xu, 2024; Zhang et al., 2019). Malgré les connaissances et l'intérêt croissant à leur sujet, ces mécanismes sont encore très peu considérés en simulation de conduite avec haptique.

Troisièmement, l'influence conjointe du retour haptique et des mécanismes émotionnels sur la performance a fait l'objet de peu d'études dans notre contexte de recherche (Jiang et al., 2025). Comme nous l'avons vu plus tôt, la littérature soutient que le retour haptique et les mécanismes émotionnels influencent individuellement la performance, mais qu'ils peuvent également interagir entre eux. En explorant cette thématique, il serait possible d'avoir une compréhension plus fine des différences de performance entre les conducteurs, et d'expliquer certains résultats contradictoires (Beaudry & Pinsonneault, 2005; Béquet, 2023). Cependant, les études portant sur cet effet commun sont encore très limitées.

4. Approche méthodologique

Ainsi, bien que le lien entre le retour haptique et la performance soit reconnu, les effets restent encore peu clairs, et les mécanismes émotionnels qui les influencent sont moins abordés. C'est dans cette optique que notre étude vise à répondre à la question de recherche suivante : *dans quelle mesure la régulation émotionnelle, l'inhibition émotionnelle et la charge cognitive modèrent-elles l'effet de l'haptique sur la performance en simulation de conduite ?*

Pour répondre à cette problématique, une expérience sur un simulateur de conduite a été menée auprès de vingt-cinq participants. L'étude consistait en trois tâches : une conduite régulière, une conduite multitâche et une conduite en slaloms. Entre chaque passage, la présence et l'absence de retour haptique étaient manipulées, suivant un design mixte intra-inter participants. Les données ont été collectées par le biais de questionnaires, d'un test comportemental et du simulateur lui-même. Pour mener cette étude, nous avons reçu l'approbation du Comité Ethique de la Recherche le 31 mars 2025 (projet n°2025-6406).

5. Contribution

D'un point de vue scientifique, cette étude contribue à combler le manque de connaissances sur nos sujets d'étude dans la littérature. Elle apporte un éclairage sur les théories James-Lange (1884/1994), de la charge cognitive (Paas & Sweller, 2012; Sweller, 1988) et de la régulation émotionnelle (Gross & John, 1998), en démontrant que ces différentes notions sont liées et peuvent avoir un effet commun sur la performance de conduite. Plus largement, elle ouvre la voie à de nouvelles réflexions en HCI (Human-Computer Interaction), en soulignant que l'effet de certaines fonctionnalités technologiques ne peut pas être pleinement compris sans tenir compte des mécanismes émotionnels et cognitifs des utilisateurs.

D'un point de vue plus pratique, les résultats permettent d'envisager une nouvelle manière de considérer le retour haptique dans les formations de conduite par simulation. Ils appuient les constats de travaux récents, qui encouragent la considération des différences individuelles et contextuelles dans les formations, et convergent vers une recommandation principale : la personnalisation. Plus précisément, en identifiant les conditions dans lesquelles le retour haptique s'avère bénéfique ou, au contraire, contre-productif, cette recherche pourrait fournir des pistes concrètes pour manipuler les fonctionnalités technologiques des simulateurs de façon plus souple et adaptative. Par exemple, la présence haptique pourrait être adaptée à la nature de la tâche. Ainsi, au-delà de la contribution théorique, cette recherche vise également à

contribuer au développement de formations plus personnalisées, et potentiellement plus efficaces, notamment dans des contextes professionnels exigeants.

6. Structure du mémoire

Ce mémoire suit une structure divisée en trois chapitres, en commençant par cette introduction. Cette section a pour but d'établir l'environnement de la recherche et les manques de connaissances que l'on trouve dans ce secteur. Le deuxième chapitre de ce mémoire consiste en un article scientifique. Cette section inclut notamment l'état de l'art entourant notre problématique, la méthodologie mise en place pour mener la recherche, ses résultats et leur interprétation. Enfin, le troisième chapitre aborde la conclusion de ce mémoire. L'objectif de cette dernière est de comprendre de quelle façon notre étude s'ancre dans les enjeux sociétaux actuels liés à la sécurité routière et aux outils de simulation, ainsi que d'aborder sa contribution au phénomène.

Tableau 1. Contribution personnelle aux étapes de la recherche

Etape de la recherche	Part de contribution
Objectif de recherche	Développement de la direction et de la question de recherche selon le contexte théorique : 50%
Design expérimental	Sélection des tâches expérimentales, mise en forme du protocole de test, rédaction des questionnaires et organisation de la salle de collecte : 80%
Conformité éthique	Rédaction et modifications du CER : 20%
Recrutement	Définition des critères de participation, ainsi que création, lancement et suivi de la planification de sessions : 60%
Pré-tests et collecte	Réalisation et suivi du déroulement des sessions de test et communication avec le partenaire : 90%
Formatage des données	Exportation, nettoyage et synchronisation des données : 80%
Analyse des données	Analyse statistique et interprétation des résultats : 80%
Rédaction	Ecriture, mise en forme et développement : 100%

Références

- Alonso, F., Faus, M., Riera, J. V., Fernandez-Marin, M., & Useche, S. A. (2023). Effectiveness of Driving Simulators for Drivers' Training : A Systematic Review. *Applied Sciences*, 13(9), 5266. <https://doi.org/10.3390/app13095266>
- Association canadienne des professionnels de la sécurité routière. (2025). *Vision Zéro, l'approche systémique de la sécurité routière et la décennie d'action des Nations Unies*. <https://carsp.ca/fr/news-and-resources/road-safety-information/vision-zero-and-the-safe-system-approach/>
- Beaudry, A., & Pinsonneault, A. (2005). Understanding User Responses to Information Technology : A Coping Model of User Adaptation. *MIS Quarterly*, 29(3), 493. <https://doi.org/10.2307/25148693>
- Benloucif, M. A., Sentouh, C., Floris, J., Simon, P., & Popieul, J.-C. (2019). Online adaptation of the Level of Haptic Authority in a lane keeping system considering the driver's state. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 61, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.08.013>
- Béquet, A. J. (2023). *Etude du stress et de sa régulation en contexte de conduite autonome à l'aune des différences individuelles*. [Thèse de doctorat, Université Lyon II]. HAL. <https://theses.hal.science/tel-04146982v1/document>
- Braun, M., Weber, F., & Alt, F. (2022). Affective Automotive User Interfaces—Reviewing the State of Driver Affect Research and Emotion Regulation in the Car. *ACM Computing Surveys*, 54(7), 1-26. <https://doi.org/10.1145/3460938>
- Campos, J. L., Bédard, M., Classen, S., Delparte, J. J., Hebert, D. A., Hyde, N., Law, G., Naglie, G., & Yung, S. (2017). Guiding Framework for Driver Assessment Using Driving Simulators. *Frontiers in Psychology*, 8, 1428. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01428>
- European Transport Safety Council. (2025). *Ranking EU progress on road safety: 19th Road Safety Performance Index Report*. (PIN Report No. 19). ETSC. <https://etsc.eu/wp-content/uploads/ETSC-2025-Annual-PIN-Report-DIGITAL-V2.pdf>
- Gross, J. J. (1998). Antecedent- and response-focused emotion regulation: Divergent consequences for experience, expression, and physiology. *Journal of Personality and Social Psychology*, 74(1), 224-237. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.74.1.224>

- Hoyt, R. E. (2019). The Impact of Motor Vehicle Simulator Training on Law Enforcement Officer Driving Behavior : Empirical Evidence from Accident Frequency and Severity. *Journal of Insurance Regulation*. <https://doi.org/10.52227/26011.2019>
- Huo, F., Wang, T., Fang, F., & Sun, C. (2024). The influence of tactile feedback in In-vehicle central control interfaces on driver emotions : A comparative study of touchscreens and physical buttons. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 101, 103586. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2024.103586>
- James, W. (1884). What is an emotion? *Mind*, 9(34), 188-205. <https://doi.org/10.1093/mind/os-IX.34.188>
- James, W. (1994). The physical basis of emotion (Original work published in 1894). *Psychological Review*, 101(2), 205–210. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.101.2.205>
- Jeon, M., Walker, B. N., & Yim, J.-B. (2014). Effects of specific emotions on subjective judgment, driving performance, and perceived workload. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 24, 197-209. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.04.003>
- Jiang, Y., Yao, X., Zhu, Y., Gong, X., Yao, Z., Wong, Y., Guo, Y., & Mi, H. (2025). Miau-BOT : A Haptic Creature Design for Enhancing Emotional Regulation in Driving Scenarios. *Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-8. <https://doi.org/10.1145/3706599.3720107>
- Liu, J., Wang, X., & Zhu, L. (2025). The impact of two computer-aided emotion regulation strategies on risky driving behaviors in a virtual environment. *BMC Psychology*, 13(1), 865. <https://doi.org/10.1186/s40359-025-03211-z>
- Messerotti Benvenuti, S., Sarlo, M., Buodo, G., Mento, G., & Palomba, D. (2015). Influence of impulsiveness on emotional modulation of response inhibition : An ERP study. *Clinical Neurophysiology*, 126(10), 1915-1925. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.12.012>
- Ministère des Transports et de la Mobilité durable. (2023). *Plan d'action sécurité routière 2023-2028*. Gouvernement du Québec. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/transports/ministere-des-transports/Plan-action-securite-routiere/Plan_action_securite_routiere_2023-2028.pdf
- Paas, F., & Sweller, J. (2012). An Evolutionary Upgrade of Cognitive Load Theory : Using the Human Motor System and Collaboration to Support the Learning of Complex

- Cognitive Tasks. *Educational Psychology Review*, 24(1), 27-45.
<https://doi.org/10.1007/s10648-011-9179-2>
- 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>
- Prohn, M. J., & Herbig, B. (2022). Traffic safety knowledge gain of ambulance drivers after simulator-based training. *BMC Medical Education*, 22(1), 216.
<https://doi.org/10.1186/s12909-022-03279-w>
- Rego, C., & Montague, E. (2023). The Impact of Feedback Modalities and the Influence of Cognitive Load on Interpersonal Communication in Nonclinical Settings : Experimental Study Design. *JMIR Human Factors*, 10, e49675.
<https://doi.org/10.2196/49675>
- Rincón-Pérez, I., Sánchez-Carmona, A. J., Levy, D., López-Martín, S., Hinojosa, J. A., & Albert, J. (2025). The influence of emotional stimuli on response inhibition : A systematic review in non-clinical adults. *Frontiers in Psychology*, 16, 1577486.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1577486>
- Shin, J.-G., & Kim, S.-H. (2021). Intelligibility of Haptic Signals in Vehicle Information Systems. *Sensors*, 21(13), 4583. <https://doi.org/10.3390/s21134583>
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving : Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- United Nations Department of Safety and Security. (2019). *Road safety strategy for the United Nations system and its personnel: A partnership for safer journeys*. United Nations. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/2020/09/road_safety_strategy_booklet.pdf
- World Health Organization. (2025). *Road safety takes centre stage at world's leading transport forum*. <https://www.who.int/news/item/28-05-2025-road-safety-takes-centre-stage-at-world-s-leading-transport-forum>
- World Health Organization. (2023). *Road traffic injuries*. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>
- Yao, Y., & Xu, D. (2024). Unconscious cognitive reappraisal and unconscious expression suppression regulate emotional responses : An ERP study. *Current Psychology*, 43(9), 7772-7784. <https://doi.org/10.1007/s12144-023-04943-0>

Zhang, L., Fan, H., Wang, S., & Li, H. (2019). The Effect of Emotional Arousal on Inhibition of Return Among Youth With Depressive Tendency. *Frontiers in Psychology, 10*, 1487. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01487>

Chapitre 2 – Article scientifique

Vibrations, émotions et performance : Comprendre l’effet du retour haptique en simulation de conduite

Alice Gambaro, Constantinos Coursaris, Ruxandra Monica Luca

Résumé

Dans un contexte où la formation devient essentielle pour améliorer la sécurité routière, le retour haptique est de plus en plus utilisé dans les simulateurs de conduite pour augmenter le réalisme et améliorer l’expérience d’apprentissage. Cependant, son effet sur la performance reste encore flou entre les contextes, et plusieurs travaux soulignent le besoin d’évaluer le rôle des différences individuelles, notamment l’inhibition émotionnelle, la charge cognitive et la régulation émotionnelle.

Cette étude mobilise les théories de James-Lange, de la charge cognitive et de la régulation émotionnelle pour évaluer dans quelle mesure ces mécanismes modèrent l’effet du retour haptique sur la performance en simulation de conduite. Dans cet objectif, une expérience a été menée auprès de vingt-cinq participants sur un simulateur de conduite Virage Simulation. Trois tâches de conduite distinctes (régulière, multitâche, slaloms) ont été mises en place, et chacune a été administrée avec ou sans retour haptique. Les données émotionnelles, cognitives et de performance ont été collectées à travers des questionnaires, une tâche de Stroop émotionnelle et directement depuis le simulateur, pour ensuite être analysées statistiquement.

Les résultats indiquent que l’inhibition émotionnelle, la charge cognitive et la régulation émotionnelle jouent un rôle modérateur important. Cependant, les effets varient selon les tâches et les profils des conducteurs, révélant des dynamiques parfois inversées. De ce fait, cette hétérogénéité amène à considérer une intégration plus adaptative du retour haptique.

Cette étude souligne ainsi l’importance d’intégrer les mécanismes émotionnels et cognitifs pour mieux comprendre l’effet du retour haptique sur la performance, et suggère de recentrer la conception de programmes de formation autour de l’utilisateur et de son profil émotionnel.

1. Introduction

La sécurité routière représente un enjeu majeur dans notre société, où l'un des thématiques clés est le comportement humain, responsable de plus de 70% des accidents de la route (McCarty & Kim, 2024). Pour pallier cette préoccupation, les simulateurs de conduite automobile sont très appréciés par les chercheurs et les responsables pédagogiques : ils permettent à la fois de former dans un environnement contrôlé et sécurisé pour inculquer les bons comportements, mais aussi d'étudier plus finement l'interaction entre le conducteur et son véhicule (Petermeijer et al., 2015). Dans le but de rendre l'expérience plus immersive et proche des conditions réelles, plusieurs technologies ont été intégrées au fil du temps, telles que la réalité virtuelle, les environnements dynamiques et le retour haptique (Shetty et al., 2021). Ce dernier peut notamment se caractériser par des mouvements et vibrations reproduisant certaines sensations physiques qui contribuent à accentuer le sentiment de réalisme. Au-delà de cette faculté sensorielle, certaines études ont démontré que le retour haptique pouvait également améliorer la performance (Cheng et al., 2025).

En parallèle, une tendance croissante émerge chez les chercheurs, qui s'intéressent à l'influence des émotions sur l'interaction humain-technologie (Stein et al., 2015). Parmi ces travaux, certains abordent plus spécifiquement l'effet retour haptique sur les émotions ressenties (Shin & Kim, 2021). Ces études s'alignent avec la théorie de James-Lange (1884/1994), selon laquelle les émotions sont directement influencées par les changements corporels des individus. Qu'elles soient ponctuelles ou durables, elles impactent les comportements humains, notamment en simulation de conduite, où elles peuvent altérer la vigilance et la prise de décision (LeBlanc & Posner, 2022 ; Provitolo et al., 2022). Réguler efficacement ses émotions devient donc essentiel, car ces dernières peuvent directement influencer la performance des conducteurs à travers des indicateurs tels que la vitesse ou la distance par rapport au centre de la voie (Michon, 1985). Ainsi, la régulation émotionnelle constitue une thématique clé dans notre contexte, car elle caractérise les tentatives d'influencer les émotions que l'on ressent, quand on les ressent, et comment on les exprime (Gross, 1998). De ce fait, plusieurs chercheurs insistent sur la nécessité d'en approfondir l'étude pour mieux comprendre les différences individuelles et leurs effets sur la performance de conduite (Jeon et al., 2014).

Toutefois, malgré cet intérêt croissant, les résultats des recherches sont souvent hétérogènes, et la littérature contient encore des lacunes (Scheibe & Moghimi, 2021).

Premièrement, les résultats des études antérieures sur les émotions sont incohérents selon les contextes, et le besoin de les examiner plus finement à travers des tâches expérimentales plus variées est croissant (Blanke et al., 2022). Ce point est d'autant plus important que cette thématique représente un intérêt grandissant dans le contexte de la conduite (Liu et al., 2025). En nous appuyant sur la théorie de James-Lange (1884/1994), cette étude permet d'examiner plus précisément comment les mouvements et vibrations du retour haptique peuvent influencer les émotions des conducteurs.

Deuxièmement, les études existantes en simulation de conduite avec haptique considèrent très peu les stratégies de gestion émotionnelle. En effet, bien que la recherche ait principalement abordé les stratégies conscientes de régulation, notamment la réévaluation et la suppression, des travaux récents soulignent le manque de connaissances quant à leur interaction avec le retour haptique (Gross & John, 2003; Liu et al., 2025). Cette focalisation soulève également un manque de connaissances au sujet des stratégies inconscientes, qui se rejoignent autour d'une même idée : l'inhibition émotionnelle inconsciente (Yao & Xu, 2024; Albert et al., 2010; Rincón-Pérez et al., 2025; Zhang et al., 2019). Cette lacune est importante car, en contexte de conduite, ces mécanismes, conscients et inconscients, peuvent directement impacter les comportements routiers (Jeon et al., 2014). Ainsi, en nous appuyant sur la théorie de la régulation émotionnelle (Gross & John, 1998) et sur les travaux émergents sur l'inhibition émotionnelle, cette étude permet d'apporter une vision globale de ces stratégies dans notre domaine d'étude.

Troisièmement, le rôle de la charge cognitive dans les stratégies de gestion émotionnelle face au retour haptique reste mal compris. Cette dernière peut toutefois influencer la manière dont les émotions sont perçues, traitées et régulées (Van Dillen et al., 2009), constituant ainsi une caractéristique essentielle de la régulation émotionnelle (Maranges et al., 2017). En nous appuyant sur la théorie de la charge cognitive (Sweller, 1988), il est possible d'examiner plus finement la manière dont les individus gèrent leur quantité limitée de ressources mentales face aux événements de la route, et l'effet de ce mécanisme sur leurs émotions.

Ainsi, en influençant les réactions corporelles, le retour haptique peut altérer les émotions des conducteurs. La manière dont ces dernières sont régulées consciemment et inconsciemment, ainsi que la charge cognitive engendrée pourraient ensuite jouer rôle déterminant dans le comportement et la performance de conduite. Pourtant, ces interactions restent peu étudiées, ce qui nous amène à soulever la question suivante :

Dans quelle mesure la régulation émotionnelle, l'inhibition émotionnelle et la charge cognitive modèrent-elles l'effet de l'haptique sur la performance en simulation de conduite ?

Pour répondre à cette interrogation, nous avons mené une expérience auprès de vingt-cinq participants sur un simulateur de conduite Virage Simulation. Les conditions avec et sans retour haptique ont été comparées dans trois tâches reproduisant trois contextes de conduite distincts : conduite régulière, multitâche et en slaloms.

En nous appuyant sur les théories précédemment citées, les résultats ont permis de confirmer l'importance des mécanismes émotionnels en simulation de conduite. Ils ont aussi développé les connaissances sur leur interaction avec le retour haptique, apportant des constats variés selon les différents contextes de conduite. De ce fait, le retour haptique pourrait être une aide pour certains, mais une gêne pour d'autres, nous amenant à revoir le développement des programmes de formations.

Les sections suivantes aborderont l'état de l'art, la méthodologie, les résultats obtenus, puis une discussion suivie d'une conclusion.

2. État de l'art : Retour haptique, intensité émotionnelle et performance

Cette section vise à définir notre modèle de recherche. Elle repose sur l'idée que les signaux sensoriels du retour haptique influencent la performance, plus spécifiquement à travers les états émotionnels qu'il entraîne. Cette section examine d'abord l'effet du retour haptique sur l'intensité émotionnelle perçue, pour ensuite étudier les notions qui pourraient influencer ce lien, notamment la capacité d'inhibition inconsciente et la charge cognitive. Nous continuerons en abordant l'effet de cette intensité sur la performance en simulation de conduite, et l'importance des stratégies de régulation émotionnelle.

2.1 Effet du retour haptique sur l'intensité émotionnelle

La technologie haptique renvoie à l'ensemble des dispositifs permettant de transmettre des informations par le toucher, notamment à travers des stimulations tactiles ou kinesthésiques (Srinivasan & Basdogan, 1997). Les dispositifs tactiles correspondent, par exemple, à des vibrations, tandis que ceux kinesthésiques consistent en des forces ou des mouvements exercés sur l'utilisateur. Dans les simulateurs de conduite, ces stimulations peuvent prendre différentes

formes, comme des forces appliquées au volant, ou des mouvements et vibrations du siège et des commandes, visant à reproduire certaines sensations physiques de la conduite réelle.

En parallèle, les émotions peuvent être définies en considérant deux dimensions : la valence, qui traduit la nature plaisante ou déplaisante du ressenti, et l'activation, qui exprime son niveau d'intensité plus ou moins élevé (Russell, 1980). Dans cette perspective, la théorie de James-Lange (1884/1994) constitue une base théorique essentielle aux recherches actuelles, et soutient que les émotions découlent de la perception des changements corporels provoqués par les stimuli externes. En d'autres termes, l'individu ressent d'abord les modifications physiologiques provoquées par le stimulus, puis les interprète comme un état émotionnel, influençant ainsi ses niveaux de valence et d'activation perçus. Ainsi, les signaux du retour haptique peuvent constituer une source de stimulation sensorielle capable d'entraîner ces réactions corporelles, impactant l'intensité émotionnelle perçue par le conducteur (Huo et al., 2024). Cependant, les études existantes à ce sujet en simulation de conduite sont limitées, ne permettant pas d'avoir un aperçu clair des effets du retour haptique sur la valence et l'activation (Pietra et al., 2021). Il paraît donc pertinent d'étudier comment cet effet se manifeste spécifiquement dans notre contexte de recherche.

Des études récentes ont montré que le retour haptique peut générer une valence perçue plus positive quand il renforce les sensations de confort et de contrôle du véhicule (Huo et al., 2024). A l'inverse, il peut aussi provoquer une valence perçue plus négative en brouillant la concentration des conducteurs quand il est perçu comme trop intense (Alotaibi et al., 2022). Nous pouvons ainsi formuler l'hypothèse suivante :

H1a : Le retour haptique est associé à la valence perçue.

De la même manière, le retour haptique peut augmenter l'activation perçue, entraînant une hausse de l'attention et de meilleurs réflexes (Alotaibi et al., 2022). Toutefois, il a été démontré qu'il peut aussi réduire l'activation, en produisant un effet apaisant et une sensation de conduite plus fluide (Béquet, 2023). De ce fait, nous pouvons imaginer que :

H1b : Le retour haptique est associé à l'activation perçue.

Ces nuances suggèrent que l'effet du retour haptique ne peut pas être strictement positif ou négatif, mais plutôt qu'il dépend de l'individu, du signal sensoriel et de sa cohérence selon le contexte (Huo et al., 2024). Dans la littérature, plusieurs auteurs soulignent donc l'importance de varier les tâches expérimentales pour mieux comprendre ces effets (Shin & Kim, 2021). Le

modèle de Michon (1985) classe les tâches de conduite selon leur exigence cognitive et temporelle, et les répartit sur trois niveaux.

Tout d'abord, le niveau « opérationnel » concerne les tâches à faible exigence cognitive, mais à forte exigence temporelle, nécessitant des actions rapides pour gérer la trajectoire et le contrôle du véhicule par exemple. Ce type de tâche est régulièrement utilisé comme baseline pour observer la place du retour haptique dans des conditions de conduite stables et sans distraction (Benloucif et al., 2019; Béquet, 2023). Ensuite, les tâches associées au niveau « stratégique » demandent une charge cognitive élevée, mais une exigence temporelle plus faible. Les tâches de type NRDT (Non-Driving Related Tasks), qui consistent à réaliser une activité secondaire en parallèle de la conduite principale, comme la mémorisation d'informations (Du et al., 2020), s'inscrivent parfois dans ces caractéristiques. Ce niveau permet d'observer la manière dont la gestion des ressources attentionnelles influence la perception émotionnelle et l'adaptation au volant (Huo et al., 2024). Enfin, le niveau « tactique » renvoie à des tâches combinant une exigence cognitive intermédiaire mêlée à une exigence temporelle forte, comme les slaloms ou les évitements d'obstacles (Béquet, 2023). Elles permettent d'évaluer comment les états émotionnels influencent la capacité d'adaptation des conducteurs (Du et al., 2020). En tenant compte de ces distinctions, il devient possible d'examiner plus précisément la manière dont le retour haptique modifie les émotions au volant.

2.2 Rôle modérateur de l'inhibition émotionnelle et de la charge cognitive

Pour comprendre plus finement les nuances entre le retour haptique et l'intensité émotionnelle, il est nécessaire d'aborder la régulation émotionnelle, un concept important et actuel dans l'étude de l'interaction humain-technologie. En ce sens, la littérature met en évidence un manque de connaissances sur les mécanismes de régulation inconscients (Yao & Xu, 2024), qui pourraient pourtant éclairer les différences émotionnelles entre individus (Battaglia et al., 2021). Bien que différents travaux aient exploré ce phénomène, les approches demeurent hétérogènes (Rincón-Pérez et al., 2025) : certains parlent de « contre-régulation émotionnelle automatique » (Zhang et al., 2019), d'autres de « modulation affective du contrôle inhibiteur » (Rincón-Pérez et al., 2025) ou encore de « suppression expressive inconsciente » (Yao & Xu, 2024).

Malgré cette diversité, les terminologies convergent globalement vers une idée commune : la capacité automatique et non intentionnelle à atténuer une réponse émotionnelle face à un stimulus, sans contrôle conscient. Dans la continuité des recherches existantes, nous adopterons

le terme d'«inhibition émotionnelle inconsciente». Plusieurs études montrent que cette dernière exerce un effet sur l'intensité émotionnelle, et que ce lien peut même être bidirectionnel, amenant les deux dimensions à s'influencer mutuellement (Yao & Xu, 2024). Par exemple, Albert et al., (2010) ont observé qu'un contexte à valence positive rend l'inhibition de réponses motrices plus difficile, tandis que Messerotti Benvenuti et al. (2015) ont vu que des individus à faible inhibition peuvent percevoir une activation plus élevée dans certains contextes.

En simulation de conduite, ce concept soulève un intérêt croissant (Liu et al., 2025). En effet, la notion d'inhibition émotionnelle inconsciente représente un mécanisme particulièrement pertinent, car inhiber inconsciemment une réaction émotionnelle peut influencer directement le comportement routier du conducteur. Battaglia et al. (2021) ont démontré qu'elle peut même prévenir des actions inadaptées, notamment lors de prise de décision rapide. L'étude de Liu et al. (2025) confirme ce constat. Elle souligne que la suppression expressive inconsciente, l'une des nombreuses formes d'inhibition mentionnées précédemment, s'est révélée efficace pour réguler la colère et atténuer les comportements risqués.

Cependant, la théorie du contrôle attentionnel (Eysenck et al., 2007) souligne que l'efficacité des stratégies de régulation, dont l'inhibition inconsciente, dépend de plusieurs facteurs, à commencer par le niveau de contrôle attentionnel de l'individu. En effet, une forte capacité d'inhibition traduit en général un bon contrôle émotionnel. Toutefois, d'autres éléments entrent en jeu, comme l'intensité et la pertinence du stimulus émotionnel (Battaglia et al., 2021), le type de tâche (Rincón-Pérez et al., 2025) et la dynamique temporelle (Yao & Xu, 2024). Les effets de l'inhibition peuvent ainsi se manifester différemment selon la nature et la temporalité de la tâche. Par exemple, une forte capacité d'inhibition peut accentuer fortement, mais temporairement l'activation en raison du coût cognitif nécessaire à l'intégration du retour sensoriel (Albert et al., 2010), avant de la stabiliser progressivement et de réguler efficacement les émotions (Messerotti Benvenuti et al., 2015). A l'inverse, une inhibition plus faible peut détourner l'attention de la tâche, ce qui peut réduire l'activation dans un premier temps, mais l'amplifier à mesure que la tâche se déroule (Eysenck et al., 2007). Dans cette perspective, il devient pertinent de considérer les effets suivants :

H2a : La capacité d'inhibition émotionnelle modère l'effet du retour haptique sur la valence perçue.

H2b : La capacité d'inhibition émotionnelle modère l'effet du retour haptique sur l'activation perçue.

Ces constats nous permettent également de souligner l'importance de la charge cognitive dans ce mécanisme. Cette dernière se définit comme la quantité de ressources mentales mobilisées pour accomplir une tâche (Crandall & Karadoğan, 2021), et son influence sur les émotions est déjà bien établie dans la littérature (Mitchell et al., 2007; Ochsner & Gross, 2005). Plus précisément, la théorie de la charge cognitive stipule que la quantité de ressources mobilisées influence directement la manière dont les émotions sont perçues et régulées (Sweller, 1988), point également constaté dans plusieurs études (Maranges et al., 2017; Van Dillen et al., 2009).

Toutefois, cette quantité limitée de ressources individuelles varie selon la complexité et les exigences de la tâche (Maranges et al., 2017). Ainsi, à un niveau modéré, une charge cognitive élevée peut réduire la perception d'émotions négatives (Van Dillen et al., 2009), mais aussi favoriser les émotions positives (Maranges et al., 2017). Par ailleurs, la théorie du contrôle cognitif suggère qu'une charge élevée peut mobiliser un effort plus important et nécessiter davantage de ressources attentionnelles, augmentant ainsi l'activation (Engström et al., 2017). Certains travaux approfondissent encore ce sujet, et précisent que ces effets nécessitent un certain équilibre pour être efficaces. En effet, une surcharge cognitive tend à réduire l'efficacité du contrôle émotionnel, en saturant la mémoire de travail (Crandall & Karadoğan, 2021), tandis qu'une charge trop faible n'engage pas pleinement l'individu et peut entraîner un débordement cognitif, poussant ce dernier à être distrait par des stimuli non pertinents (Gupta et al., 2016). La charge cognitive apparaît donc comme un facteur susceptible d'influencer l'intensité émotionnelle des individus.

Dans le domaine de la conduite, la charge cognitive est très étudiée (Engström et al., 2017). En effet, plusieurs études ont montré qu'un retour haptique cohérent et adapté à la tâche peut réduire cette dernière, facilitant le traitement d'information et la prise de décision (Crandall & Karadoğan, 2021). A l'inverse, mal calibré, il peut entraîner des vibrations trop fortes ou trop soudaines, et créer l'effet inverse, engendrant une surcharge attentionnelle (Rego & Montague, 2023). Ainsi, au-delà de son lien avec l'intensité émotionnelle, la charge cognitive semble également étroitement liée au traitement des signaux haptiques.

Dans cette perspective, la charge cognitive peut être envisagée comme un élément intermédiaire dans la relation entre retour haptique et réactions émotionnelles. En effet, les signaux haptiques constituent une source d'information sensorielle qui doit être traitée par le conducteur en parallèle des informations visuelles et décisionnelles de la conduite. Selon leur intensité et leur synchronisation avec la tâche, ces signaux peuvent faciliter l'orientation de

l'attention vers des informations pertinentes, mais aussi nécessiter des ressources attentionnelles supplémentaires, augmentant la charge cognitive (Maranges et al., 2017). Ces variations dans la mobilisation des ressources peuvent ensuite influencer la manière dont les individus réagissent et perçoivent le retour haptique. En effet, lorsque les ressources attentionnelles sont limitées, les conducteurs peuvent traiter les informations différemment, ce qui peut influencer leurs réactions émotionnelles (Van Dillen et al., 2009).

La charge cognitive peut ainsi influencer la manière dont les conducteurs traitent les signaux haptiques, et par conséquent, moduler la relation entre le retour haptique et l'intensité émotionnelle (Maranges et al., 2017). Toutefois, cette influence semble fortement varier selon la nature des tâches et des contextes d'utilisation. Cela peut notamment s'expliquer par le fait que, bien que plusieurs études suggèrent que l'effet du retour haptique dépend du niveau de charge cognitive, ces résultats demeurent encore exploratoires et ne permettent pas de conclure à un effet linéaire, ou théoriquement prévisible (Crandall & Karadoğan, 2021). En somme, ces constats s'inscrivent dans la continuité des connaissances actuelles sur le retour haptique, dont les effets peuvent varier selon les tâches (Maranges et al., 2017). Finalement, ces éléments soulignent l'importance de considérer la charge cognitive dans l'étude des réactions émotionnelles face au retour haptique, et invitent à approfondir cette relation. De ce fait, nous pouvons émettre les sous-hypothèses suivantes :

H3a : La charge cognitive modère l'effet du retour haptique sur la valence perçue.

H3b : La charge cognitive modère l'effet du retour haptique sur l'activation perçue.

2.3 Effet de l'intensité émotionnelle sur la performance

L'influence des émotions sur la performance est régulièrement étudiée, et s'appuie sur les modèles qui décrivent les émotions selon deux axes : la valence et l'activation perçues (Russell, 1980). Plusieurs études ont démontré qu'une valence plus positive tend globalement à améliorer la performance (Beaudry & Pinsonneault, 2005). Cependant, certains chercheurs soulignent le fait que cet effet n'est pas universel, deux émotions partageant une même valence pouvant produire des effets différents sur la performance (Jeon et al., 2014). De ce fait, nous pouvons imaginer que :

H4a : La valence perçue influence la performance.

En parallèle, l'effet de l'activation sur la performance est souvent interprété à travers la loi de Yerkes & Dodson (1908), souvent représentée sous la forme d'une courbe en U inversé (De

Bonis, 1968). Elle explique que la performance est optimale à un niveau intermédiaire d'activation, tandis que des niveaux trop élevés ou trop faibles peuvent la dégrader, entraînant une surcharge attentionnelle ou un désengagement de l'individu (Béquet, 2023). Cette variabilité dans les effets peut notamment s'expliquer par le contexte et la difficulté de la tâche. En effet, plusieurs chercheurs soulignent un manque d'inclusion de diversité de contextes dans les études (Jeon et al., 2014). La théorie de Yerkes et Dodson appuie ce point, en rappelant que le niveau optimal d'activation dépend de la complexité de la tâche. Ainsi, une forte activation peut améliorer la performance dans une tâche simple, mais la dégrader dans une tâche plus complexe, en partie, car la charge cognitive serait surchargée (De Bonis, 1968). Ainsi :

H4b : L'activation perçue influence la performance.

D'autre part, les différences individuelles jouent également un rôle, notamment au travers des stratégies de régulation émotionnelle. Ces dernières sont largement étudiées dans la littérature pour comprendre la manière dont les émotions influencent la performance (Holman & Popușoi, 2020).

Elles traduisent la capacité des individus à adapter leurs réponses émotionnelles face aux exigences de la tâche et aux stimuli perçus. Le modèle de régulation émotionnelle proposé par Gross (1998) englobe l'ensemble des efforts déployés pour influencer les émotions ressenties, le moment où elles apparaissent et la manière dont elles sont vécues ou exprimées. Parmi les nombreuses stratégies qu'il identifie, deux sont particulièrement étudiées :

la première est la réévaluation cognitive, qui consiste à modifier la manière dont une situation est interprétée afin d'atténuer l'impact émotionnel. La seconde est la suppression expressive, qui représente l'inhibition consciente des signes extérieurs de l'émotion ressentie. Les travaux plus récents de Gross (2003) affinent cette distinction : la réévaluation est généralement associée à une meilleure adaptation émotionnelle, car elle réduit l'intensité de l'émotion négative sans provoquer de surcharge physiologique. En parallèle, bien que la suppression limite les manifestations visibles de l'émotion, elle tend à maintenir, voire à augmenter, l'activation, ce qui peut nuire à la performance. Gross (2015) a continué de nuancer ces concepts, expliquant que ces effets ne doivent pas être considérés comme une vérité absolue, car la réévaluation peut aussi être contreproductive, et la suppression efficace, selon la tâche et l'intensité de l'émotion.

Des travaux récents soulignent la nécessité d'étendre l'étude de ces mécanismes au contexte de la conduite simulée, où les interactions entre émotions, attention et performance sont

particulièrement complexes (Jeon et al., 2014). Dans ce cadre, la prise en compte des stratégies de régulation émotionnelle apparaît essentielle pour expliquer les irrégularités observées entre études. En simulation de conduite avec haptique plus spécifiquement, plusieurs recherches confirment l'intérêt croissant porté à ces stratégies de régulation émotionnelle pour mieux comprendre le lien entre l'humain et les technologies (Liu et al., 2025). Cela nous permet de supposer que :

H5a : La régulation émotionnelle modère l'effet de la valence perçue sur la performance.

H5b : La régulation émotionnelle modère l'effet de l'activation perçue sur la performance.

Dans l'ensemble, nous proposons que le retour haptique influence l'intensité émotionnelle, et que cet effet est modéré par l'inhibition émotionnelle et la charge cognitive. Cette intensité agit à son tour sur la performance, tout en étant modulée par la régulation émotionnelle. En suivant le fil de ces hypothèses illustrées dans la figure 1, cette recherche vise à mieux comprendre les nuances individuelles qui encadrent l'effet des émotions dans la relation entre le retour haptique et la performance en simulation de conduite, en plaçant l'utilisateur au centre de l'analyse.

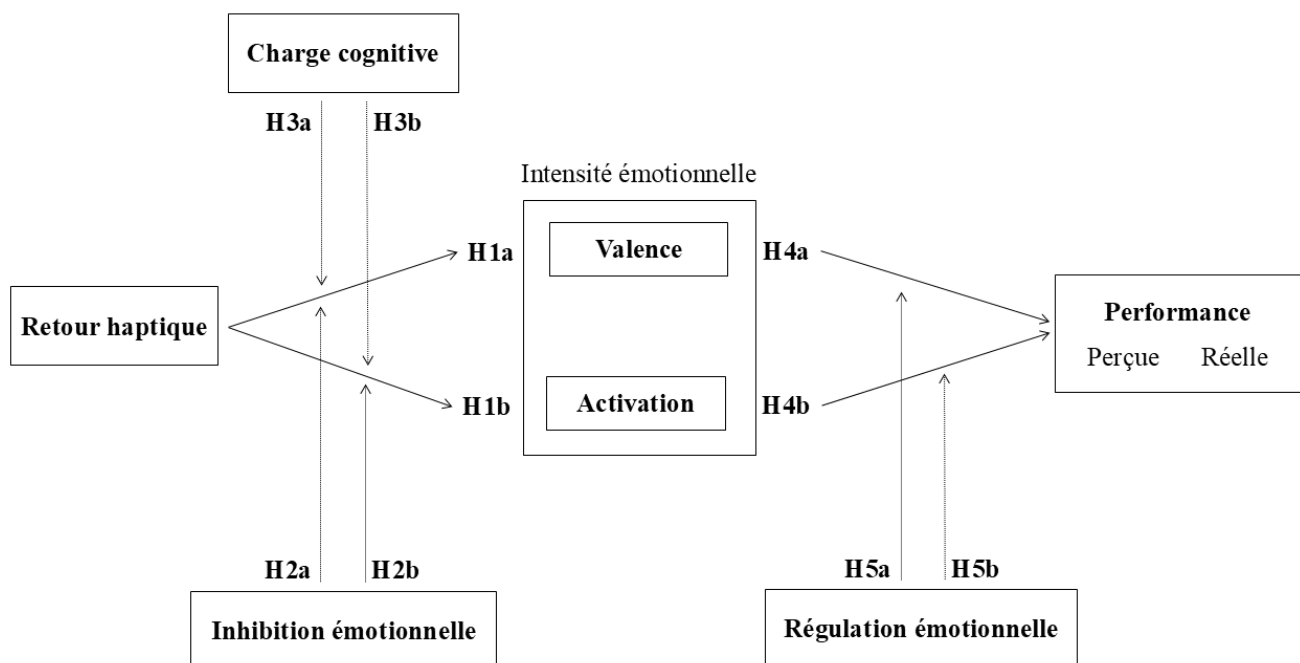


Figure 1. Modèle de recherche

3. Méthodologie

3.1 Participants

Nous avons reçu l'approbation du Comité Éthique de la Recherche pour mener cette étude le 31 mars 2025 (projet n°2025-6406). Vingt-cinq participants (12 femmes, 13 hommes) âgés de 18 à 31 ans ($M = 20.96$; $SD = 3.66$) ont pris part à l'expérience. Nous avons visé cet effectif pour nous aligner avec les études similaires en simulation automobile, qui reposent souvent sur des échantillons de taille comparable en raison des contraintes expérimentales, telles que la durée limitée, le contrôle continu ou encore le cybermalaise (Petermeijer et al., 2015). Nous avons collaboré avec un établissement d'enseignement post-secondaire proposant des programmes professionnels spécialisés, intégrant la simulation de conduite dans les cours.

Les étudiants devaient compléter les critères de participation suivants pour prendre part à l'étude : Avoir plus de 18 ans et un permis de conduire valide, être étudiant en techniques policières et avoir une compréhension avancée du français à l'oral et à l'écrit. Le recrutement s'est effectué à l'aide d'affiches déposées dans les salles de classe et les couloirs de l'école, ainsi qu'avec le soutien des enseignants. Les inscriptions aux sessions de test étaient organisées via PanelFox, plateforme utilisée pour gérer et faciliter la réservation de créneaux de participation. En fin de session, les participants recevaient une compensation de 50\$ pour leur contribution. La collecte de données s'est déroulée sur un mois, avec un minimum d'un et un maximum de quatre participants par jour.

3.2 Design expérimental

L'expérience a suivi un design expérimental mixte à mesures répétées de type 3 X 2 (trois tâches, deux conditions haptiques). Le premier facteur correspondait au type de tâches, comprenant trois catégories distinctes : régulière, multitâche et slaloms. Chaque participant réalisait successivement les trois tâches, constituant ainsi un facteur intraparticipants. Le second facteur correspondait à la condition haptique (avec et sans retour haptique). Chaque participant réalisait le scénario de conduite dans une seule de ces deux conditions, constituant un facteur interparticipants. Chaque session de test durait environ 45 minutes, et l'expérience se divisait en deux parties. Les participants commençaient par une tâche de Stroop Emotionnelle réalisée sur laptop, puis poursuivaient avec trois tâches de conduite simulée présentant des contextes distincts : conduite régulière, conduite multitâche et conduite en slaloms. Un scénario par tâche figurait dans le catalogue de scénarios du simulateur. Le même ordre de passage a été utilisé pour tous les participants. Ce choix visait à focaliser la

randomisation sur la condition haptique pour ne pas ajouter de confusion lors de l'expérience, et ne pas alourdir le protocole expérimental. Nous avons fixé une limite de temps de trois minutes pour scénario afin d'éviter des biais liés à la fatigue potentielle due à l'enchaînement des tâches.

3.3 Tâches

La tâche de *Stroop Emotionnelle* est un paradigme très utilisé pour étudier le niveau d'interférence émotionnelle des individus. Certaines personnes sont en effet plus susceptibles que d'autres de laisser leurs émotions prendre le dessus sur leur comportement (Ben-Haim et al., 2016). Pour notre étude, nous avons utilisé une version développée par le Tech3Lab. Comme le montre la figure 2, une fois devant l'écran du laptop, le participant voyait apparaître successivement des mots positifs, négatifs ou neutres, chacun affiché en rouge, vert ou bleu. Chaque couleur correspondait à une flèche du clavier (Gauche = Rouge ; Bas = Vert ; Droite = Bleu). Il devait appuyer sur la touche associée à la couleur du mot dès son apparition. Le temps de réaction et le nombre d'erreurs permettaient ainsi de mesurer l'influence de la valence émotionnelle des mots sur la performance. La durée de la tâche variait entre trois et cinq minutes, selon la rapidité de réponse du participant.

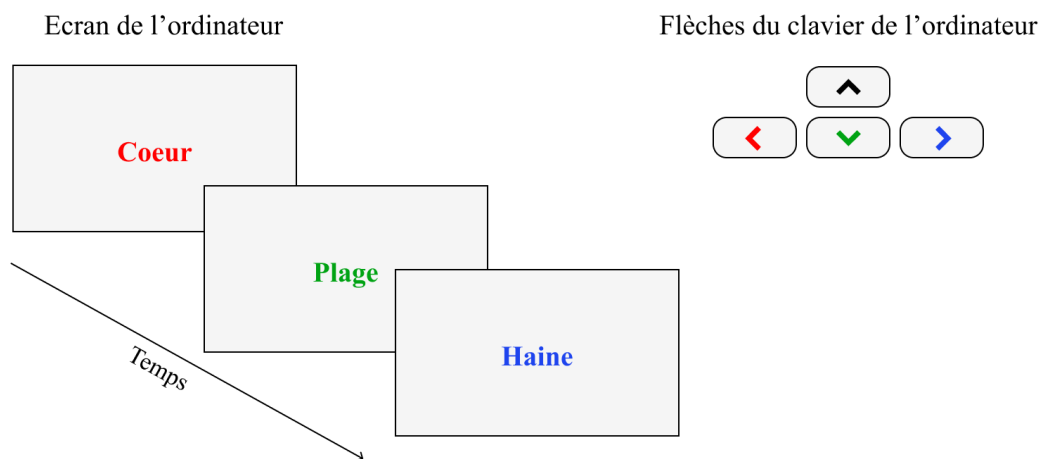


Figure 2. Visuel de la tâche de Stroop Emotionnelle

Les trois tâches de conduite ont été choisies de sorte à s'aligner avec les trois niveaux de tâches de conduite selon le modèle de Michon (1985) (section 2.2), consistant ainsi en une conduite régulière, une conduite multitâche et une conduite en slaloms.

Les scénarios de *conduite régulière* sont souvent utilisés comme condition de référence pour comparer les effets de contextes de conduite plus complexes ou spécialisés. Ce type de tâche peut correspondre au niveau opérationnel du modèle de Michon : il nécessite peu de traitement cognitif, mais une plus grande gestion du temps, ce qui permet d'observer la conduite de base du participant avant l'introduction d'éléments perturbateurs. En nous appuyant sur le protocole de Reimer et al. (2011), qui proposait une conduite urbaine guidée par instructions auditives, nous avons utilisé une forme similaire. Le conducteur devait suivre les instructions GPS orales du simulateur pour conduire en milieu urbain, tout en contrôlant son véhicule et en respectant les réglementations du Code de la route. La session durait trois minutes et constituait la première tâche présentée au participant.

La *conduite multitâche* permet d'étudier la réaction du conducteur lorsqu'il est confronté simultanément à plusieurs sources de stimulation, comme lors d'une écoute audio tout en restant concentré sur la route (Reimer & Mehler, 2011). Ce type de scénario correspond à une NRDT (Non-Driving Related Tasks), qui s'aligne avec le niveau stratégique de Michon, mobilisant ainsi des ressources cognitives plus importantes, mais moins d'exigence temporelle. En nous inspirant des travaux de Reimer & Mehler (2011), qui ont utilisé des NRDT auditives, nous avons créé notre propre scénario. Dans cette tâche, le participant devait conduire librement dans un environnement urbain, tout en écoutant attentivement un enregistrement audio simulant une transmission policière concernant un vol à main armée. Cet enregistrement avait été généré à l'aide de l'intelligence artificielle. Le scénario durait environ trois minutes, et se terminait à la fin de la bande sonore.

La *conduite en slaloms* est très utile pour confronter les conducteurs à une situation stimulante, tout en évaluant l'évolution de leur performance avec ou sans mouvements ajoutés dans les simulateurs (Feenstra et al., 2010). Ce type de tâche concorde avec le niveau tactique de Michon (1985), qui renvoie à des charges cognitive et temporelle intermédiaires. En nous basant sur des protocoles similaires à ceux de Feenstra et al. (2010) et Petermeijer (2015), qui ont utilisé des parcours de slaloms pour mesurer la stabilité et la précision de conduite, nous avons utilisé un scénario comparable. En trois minutes, les participants devaient aller le plus loin possible sur une piste parsemée de poteaux entre lesquels se diriger sans faire de collisions. Contrairement aux scénarios précédents, celui-ci demandait plus de rapidité de la part du conducteur, tout en maintenant le contrôle du véhicule. Chaque session durait environ trois minutes. A la fin de cette durée, le simulateur affichait une instruction d'arrêt, marquant la fin de l'épreuve.

Chaque scénario était présenté dans un ordre fixe aux conducteurs, plaçant la conduite régulière en première. Ce choix avait pour objectif de commencer par une tâche simple afin d'éviter des effets de fatigue ou de surcharge dès le début de l'expérience. Il visait aussi à observer l'effet du retour haptique dans un contexte de conduite de base, avant d'introduire des scénarios plus difficiles par la suite. Chacun était suivi d'un questionnaire post-tâche visant à recueillir le ressenti du participant concernant la charge cognitive, l'intensité émotionnelle et la performance perçues (voir Tableau 3. Nature et opérationnalisation des variables). L'analyse de ces trois contextes nous a permis d'aborder l'effet des émotions sur la conduite avec haptique dans trois environnements différents. Bien qu'un ordre fixe puisse entraîner des effets d'apprentissage, l'objectif de cette étude n'était pas de comparer directement les tâches entre elles, mais plutôt d'observer les variations de performance selon les contextes de conduite.

Les mesures de performance ayant aussi été adaptées à chaque tâche (Section 3.7 Mesures de performance réelle), un ordre fixe permettait de conserver une structure expérimentale adéquate pour tous les participants. Dans certaines sections de cette recherche, les scénarios seront nommés à l'aide des appellations présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Appellation des tâches

Tâche	Appellation
Conduite régulière	T1
Conduite multitâche	T2
Conduite en slaloms	T3

Note. Photographies des tâches (Annexe B)

3.4 Contexte expérimental

3.4.1 Stimuli

L'étude a été réalisée à l'aide du simulateur de conduite Virage Simulation, avec réplique d'habitacle (commandes, volant et siège), et système de mouvements, vibrations et sons intégrés. Deux simulateurs du même modèle situés côte à côte étaient disponibles dans la salle de test, mais un seul a été utilisé pour l'ensemble de la collecte. Ce choix a été fait pour éviter

de potentielles différences techniques ou de calibration entre les deux, notamment en raison de leur utilisation antérieure dans le cadre de cours spécialisés. Afin d'assurer l'uniformité des conditions de test entre les participants, nous avons donc sélectionné le simulateur de gauche pour l'ensemble des sessions. Celui de droite a été conservé en cas de problème technique, une situation qui ne s'est pas produite au cours de l'expérience. Nous avons utilisé la calibration fixée dans les simulateurs, et l'avons conservée au même niveau pour tous les participants afin d'éviter d'introduire un second facteur de variation, et de focaliser la randomisation sur la condition haptique. Cette dernière était activée ou désactivée entre chaque tâche à partir des ordinateurs de contrôle reliés au simulateur. Nous avons suivi une grille de randomisation créée au préalable pour assigner aléatoirement chaque participant à un chemin de scénarios, de manière à répartir uniformément la présence haptique entre les tâches. Ainsi, 13 participants ont complété la tâche 1 avec retour haptique et 12 sans, 12 participants ont réalisé la tâche 2 avec haptique et 13 sans et la tâche 3 a été effectuée par 13 participants avec et 12 sans retour haptique. Ce choix méthodologique visait à limiter les biais potentiels et éviter un déséquilibre entre les conditions expérimentales. L'organisation et la disposition du simulateur sont présentées dans la figure 3.

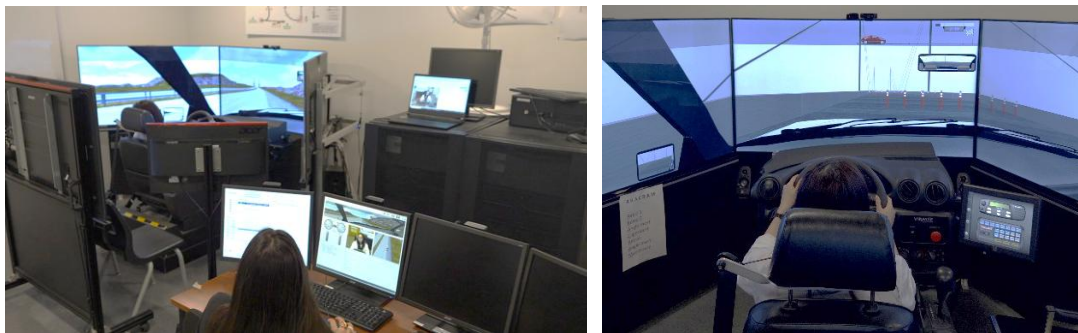


Figure 3. Photographies du simulateur

3.4.2 Dispositif expérimental et salle de test

Un bureau, sur lequel se trouvaient les écrans des ordinateurs reliés au simulateur, était aménagé pour manipuler la condition haptique entre les tâches. C'est également depuis ce poste que l'on contrôlait l'enregistrement du Real Time Data, directement issu du simulateur.

Deux webcams étaient utilisées : la première filmait le visage du participant tout au long de l'expérience, tandis que la deuxième était positionnée en arrière du participant et filmait les écrans du simulateur. Chacune était connectée à un laptop différent, permettant d'enregistrer les images et les événements marquants sur la plateforme Capture. L'un des deux laptops

servait également à la tâche de Stroop Emotionnelle. Il était placé sur une armoire grise située à droite de la salle de simulation en début d'expérience, puis déplacé près du simulateur avant le début des tâches de conduite. Tous les questionnaires (post-tâche et post-expérience) étaient présentés au participant sur iPad, via la plateforme Qualtrics. Une fois tous les tests utilisateurs passés à la fin de la collecte, toutes les données ont été synchronisées dans le logiciel Photobooth, logiciel permettant de regrouper des données issues de différentes sources.

Enfin, du matériel en cas de nausée ou mal au cœur était également disponible (sceau, bouteilles d'eau et pastilles à la menthe). La figure 4 montre l'aménagement de la salle de simulation pendant les tests utilisateurs.

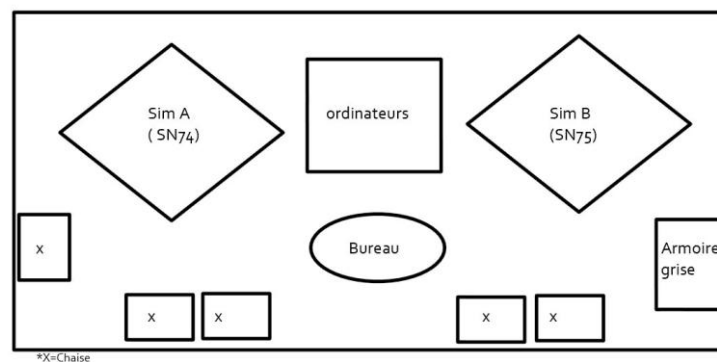


Figure 4. Schéma de l'aménagement de la salle de simulation

3.5 Procédure

Les tests se sont déroulés dans le local de simulation, avec un participant à la fois afin de garantir un environnement calme et sans distractions. Deux expérimentateurs étaient responsables du bon déroulement de l'étude : une personne s'occupait des aspects techniques en veillant au bon fonctionnement des outils, tandis que l'autre accompagnait le participant pour lui donner les instructions au cours du test. Avant chaque session, la salle et le simulateur étaient vérifiés afin d'éviter tout problème durant le test (écran, siège, frein à main, clé, etc.). A l'arrivée du participant, plusieurs étapes consécutives étaient réalisées : mise en contexte, signature du formulaire de consentement et du préquestionnaire, puis réalisation de la première tâche sur laptop. Le participant était ensuite installé sur le simulateur pour réaliser les trois tâches de conduite présentées dans un ordre constant : $T1 > T2 > T3$. Après chaque tâche, un questionnaire identique était transmis au participant. Finalement, l'expérience se terminait par un dernier questionnaire et la remise du formulaire de compensation. L'expérience durait

environ cinquante minutes au total. Tout au long de la session, le participant était informé qu’il pouvait interrompre sa participation à tout moment, conformément aux normes éthiques en vigueur.

3.6 Mesures générales

Le tableau 3 présente l’ensemble des variables incluses dans l’étude, leur nature dans leur modèle de recherche ainsi que leur instrument et moment de mesure durant l’expérience.

Tableau 3. Nature et opérationnalisation des variables

Variable	Nature	Mesure	Source	Moment
Retour haptique	Indépendante	Présence / Absence	-	Manipulée
Charge cognitive perçue	Médiatrice	Nasa TLX	Hart & Staveland, 1988	Post-tâche
Intensité émotionnelle perçue (Valence; Activation)	Médiatrice	Affective Slider	Betella & Verschure, 2016	Post-tâche
Régulation émotionnelle (Réévaluation; Suppression)	Modératrice	ERQ	Gross & John, 2003 Traduction : (Nardelli et al., 2024)	Post-expérience
Inhibition émotionnelle	Modératrice	Stroop Emotionnelle	Ben-Haim et al., 2016	Pré-simulateur
Performance réelle	Dépendante	Real Time Data <i>Voir Section 3.7</i>	-	Pendant la tâche
Performance perçue	Dépendante	Echelle multi-items	Ad hoc inspiré de : Hart & Staveland (1988) Reimer & Mehler (2011)	Post-tâche

La variable de charge cognitive perçue est mesurée par le NASA-TLX, et calculée à partir de la moyenne de ses items. Plus le score est élevé, plus la charge cognitive perçue de l’individu est forte. Concernant la variable d’intensité émotionnelle, l’Affective Slider mesure séparément la valence et l’activation perçue, en fonction du score situé entre 0 et 100 sur le curseur. Une valence plus élevée correspond à un ressenti plus positif, tandis qu’une activation plus élevée renvoie à une intensité perçue plus forte (voir Annexe A. Items de Nasa-TLX et Affective Slider).

La performance perçue correspond à l'évaluation subjective que le participant fait de sa propre efficacité durant la tâche. Cette variable a été incluse car elle peut diverger de la performance réelle, ce qui peut influencer la perception du retour haptique et l'apprentissage des conducteurs. Le questionnaire pour la mesurer consiste en une échelle multi-items, adaptée de mesures subjectives fréquemment utilisées dans les études sur la charge de travail et la simulation de conduite. Bien qu'il s'agisse d'une échelle ad hoc, sa structure reprend les principes d'évaluation utilisés dans la littérature. Le score final est calculé à partir de la moyenne de ses items, répartis comme présenté dans le tableau 4. Ainsi, un score plus élevé renvoie à une performance perçue plus élevée, tandis qu'un score plus faible signifie une performance moins bonne.

Tableau 4. Items de performance perçue

Performance perçue
Item 1 - « <i>Comment évalueriez-vous votre performance dans la tâche sur le simulateur ?</i> »
Item 2 – « <i>Si vous deviez noter votre performance dans la tâche sur le simulateur, quelle note vous donneriez-vous ?</i> »
Item 3 – « <i>Comparé(e) aux autres, comment pensez-vous avoir accompli cette tâche ?</i> »

Note. Chaque item était évalué sur une échelle de Likert allant de 0 (faible) à 7 (élevé).

Pour mesurer la régulation émotionnelle, nous avons utilisé l'ERQ (Emotion Regulation Questionnaire). L'échelle originale est composée de dix items, dont six mesurant la réévaluation et quatre la suppression. Pour cette étude, une version abrégée de six items a été retenue. Ce choix visait principalement à limiter la durée totale de l'expérience, qui comprenait déjà plusieurs questionnaires et étapes expérimentales qui risquaient d'accentuer la fatigue des participants. Cette approche permettait ainsi de réduire la charge de participation, tout en conservant les dimensions principales des concepts mesurés. Comme le montre le tableau 5, les items sélectionnés ont ainsi été choisis de manière à maintenir la mesure des deux stratégies distinctes, à travers le calcul de deux moyennes séparées. Des moyennes plus élevées renvoient à une utilisation plus fréquente des stratégies de régulation, tandis que des moyennes plus faibles indiquent qu'elles sont moins mobilisées.

Tableau 5. Items d'ERQ

Réévaluation
Item 1 - « <i>Quand je veux ressentir des émotions plus positives (comme la joie ou l'amusement), je change ma façon de penser à la situation. »</i>
Item 3 – « <i>Quand je veux ressentir moins d'émotions négatives (comme la tristesse ou la colère), je change ma façon de penser à la situation. »</i>
Item 5 – « <i>Je contrôle mes émotions en changeant ma façon de penser à la situation dans laquelle je suis. »</i>

Suppression
Item 2 – « <i>Je garde mes émotions pour moi. »</i>
Item 4 – « <i>Quand je ressens des émotions négatives, je m'assure de ne pas les exprimer. »</i>
Item 6 – « <i>Je contrôle mes émotions en ne les exprimant pas. »</i>

En parallèle, la tâche de Stroop Emotionnelle nous permettait de mesurer la capacité d'inhibition émotionnelle des participants à l'aide de l'indice d'interférence émotionnelle. Ce dernier a été calculé en observant la différence entre le temps de réaction moyen (en secondes) des stimuli émotionnels négatifs par rapport aux stimuli neutres. Plus ce score est élevé, plus le participant est sujet à être ralenti par ses émotions face aux stimuli. En d'autres termes, plus le score d'interférence émotionnelle est élevé, plus la capacité d'inhibition est faible. A l'inverse, un score faible ou négatif renvoie à une meilleure capacité d'inhibition émotionnelle élevée.

3.7 Mesures de performance réelle

En simulation de conduite, la performance est généralement observée à travers des mesures comportementales objectives. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé cinq variables clés. Afin de les comprendre et de les interpréter correctement, une connaissance approfondie des sorties de simulateur et de leur étude dans la littérature est nécessaire.

Tout d'abord, la distance du véhicule par rapport au centre de la voie est souvent développée de sorte qu'un score supérieur à 0 signifie un écart sur la droite, tandis qu'un score inférieur à 0 renvoie à un écart vers la gauche. Ainsi, plus les données s'écartent de 0, plus le véhicule est éloigné du centre de la voie, affectant la performance du conducteur (Bowers et al., 2010).

L'angle du volant suit la même dynamique : les données supérieures à 0 indiquent que le conducteur tourne beaucoup son volant vers la droite, tandis que celles inférieures à 0 signifient qu'il tourne le volant à gauche. Plus l'écart par rapport à 0 est fort, plus l'individu tend à tourner son volant, pouvant indiquer un manque de stabilité dans la maîtrise du véhicule (Green, 2007). La mesure de pédale de frein est généralement codée comme suit : un score de 0 indique que la pédale est relâchée, un score de 1 indique que la pression sur la pédale est complète, et les valeurs situées entre 0 et 1 montrent une pression partielle. Cette mesure est souvent utilisée pour évaluer le contrôle du conducteur, expliquant que les valeurs plus proches de 0 démontrent une conduite plus constante, sans besoin de changer trop régulièrement de vitesse. A l'inverse, un score proche de 0 indique le conducteur a besoin d'appuyer fortement sur la pédale de frein, ce qui est souvent connoté à une performance plus critique (Bosurgi et al., 2025). Les collisions font partie des mesures de sécurité considérées pour mesurer la performance. Ce type de mesure peut être codé de sorte à représenter le nombre de collisions exact (McManus et al., 2015), mais peut aussi être programmé de façon binaire (Bowers et al., 2010). Par exemple, 0 peut signifier une absence totale de collisions, tandis que 1 représente qu'il y a eu au moins une collision, contribuant à une moins bonne performance du conducteur. La vitesse moyenne fait partie des mesures de performance utilisée, mais est particulièrement dépendante des autres mesures de performance. En effet, une vitesse moyenne élevée ne signifie pas la même chose si la distance au centre de la voie est restreinte ou écartée (Green, 2007).

Ces mesures doivent souvent être liées pour comprendre la performance globale des individus (Bosurgi et al., 2025). Toutefois, au lieu de faire un indice regroupant tous les indicateurs, nous avons choisi de conserver les résultats propres à chacun, tout en les observant ensemble lors de la phase d'analyse. Ce choix a été motivé par le fait que chaque indicateur renvoie à un aspect distinct de la performance individuelle. De ce fait, créer un indice global risquait de masquer certaines nuances importantes. Les mesures ont ainsi été conservées et analysées individuellement, tout en menant une observation groupée des indicateurs. En parallèle, elles ne peuvent pas être universelles, mais plutôt propres à chaque tâche. Par exemple, la distance au centre de la voie peut ne pas être adaptée pour une tâche de slaloms ou d'évitements d'obstacles qui n'impliquerait pas de voie spécifique. Les mesures de performance réelle ont ainsi été assignées comme présenté dans le tableau 6.

Tableau 6. Mesures de performance réelle issues du simulateur

Variable	Tâches	Mesure
Vitesse	T1 / T2 / T3	m/s (mètres par seconde)
Angle du volant	T1 / T2 / T3	<0 = écarté à gauche 0 = centré ; >0 = écarté à droite
Distance au centre de la voie	T1 / T2	<0 = écarté à gauche 0 = centré ; >0 = écarté à droite
Pédale de frein	T1 / T2 / T3	0 (relâchée),]0–1[(partielle), 1 (complète)
Collisions	T1 / T2 / T3	0 = aucune collision ; 1 = au moins une collision

Note. Toutes ces données sont extraites du Real Time Data, directement depuis le simulateur.

A l'exception de la variable binaire de « Collisions », toutes les autres sont calculées pour donner un score moyen. De ce fait, des scores plus élevés pour l'angle du volant, la distance au centre de la voie et la pédale de frein signifient que le volant est très braqué, que l'individu est plus écarté de la voie et que la pédale de frein est plus appuyée. Certains ajustements ont été nécessaires pour certaines d'entre elles (Section 4.1).

3.8 Préparation des données

L'ensemble des données a été centralisé dans le logiciel Photobooth. Une vérification de cohérence et une mise en forme des données issues des différentes sources (questionnaires, laptop, simulateur, etc) ont été réalisées en parallèle. Au niveau des questionnaires, une vérification des alphas de Cronbach pour déterminer leur fidélité interne a été menée, ainsi que la vérification de potentiels items inversés. Un traitement plus spécifique a ensuite été appliqué aux données de performance réelle issues du Real Time Data. Nous avons d'abord regroupé les fichiers de sortie (.csv) du simulateur pour chaque participant, puis sélectionné uniquement les catégories pertinentes pour notre étude (vitesse, collisions etc.). Cela nous a permis d'obtenir une bonne visibilité de nos variables, pour une observation plus fine des valeurs.

3.9 Préparation des analyses

Tous les tests statistiques ont été réalisés sur SAS Studio (www.sas.com), et séparément pour chaque tâche à l'aide de PROC GLIMMIX. L'objectif était de s'aligner avec la question de recherche, qui visait à observer les variations des effets selon les tâches plutôt qu'à comparer les tâches entre elles. De ce fait, ce choix méthodologique permettait d'examiner les relations étudiées dans chacun des contextes de conduite. Des régressions linéaires ont ainsi été menées pour tester les effets directs, et des régressions linéaires avec interaction pour les effets de modération. Pour nous assurer de la validité des analyses, nous avons d'abord vérifié la

normalité des résidus et l'homogénéité des variances. La validité globale des modèles a ensuite été examinée à partir des résidus, des valeurs p , ainsi que de la valeur F , tout en vérifiant la cohérence entre les tests de Type I et de Type III. Cela nous permettait de nous assurer que les modèles étaient bien ajustés et que les résultats étaient fiables. En raison de notre effectif restreint de participants ($N=25$), la puissance statistique de nos analyses a pu être impactée, limitant la probabilité de détecter des effets plus subtils. Le seuil de signification utilisé a été fixé à $p = 0.05$ conformément aux études similaires récentes (Huo et al., 2024). Bien que la question des comparaisons multiples ait été considérée en raison du nombre élevé de tests statistiques réalisés, aucun ajustement n'a été appliqué, car le modèle et les hypothèses étaient testés séparément pour chaque tâche. Néanmoins, ce choix méthodologique a pu augmenter le risque d'erreur de type I. Les résultats ont donc été interprétés avec prudence, en tenant compte de la cohérence théorique des effets observés.

4. Résultats

4.1 Statistique descriptive

Lors du nettoyage de données, aucune valeur aberrante n'a été constatée. Cependant, certains ajustements ont dû être apportés. Au sujet des questionnaires, nous avons dû recoder un item inversé du NASA-TLX (Item 4 - « *Dans quelle mesure avez-vous réussi à accomplir ce qu'on vous a demandé ?* ») pour que sa valeur aille dans le même sens que celui des autres items. Nous avons obtenu une bonne fiabilité de l'échelle, avec un alpha dépassant le seuil classique de .70 ($\alpha = .78$) (Nunnally, 1978). Pour le questionnaire ERQ, certains points plus spécifiques ont été constatés. Les six items de l'échelle réduite ont apporté des niveaux de fiabilité distincts pour la suppression ($\alpha = .66$) et la régulation ($\alpha = 0.55$). De plus, un item a dû être retiré (Item 2 - « *Je garde mes émotions pour moi.* ») pour améliorer la cohérence interne. Bien que ces coefficients puissent paraître trop bas, plusieurs chercheurs soulignent que le seuil classique de .70 ne doit pas être utilisé de manière trop stricte, plus particulièrement lors de l'utilisation d'échelles courtes. En effet, un alpha plus faible ne reflète pas nécessairement un manque de cohérence, mais peut résulter d'une quantité limitée d'items. Ainsi, un alpha réduit peut être utilisé dans ces cas de figure (Schmitt, 1996; Cortina, 1993). Nos variables de régulation émotionnelle sont par conséquent tout de même utilisables, mais les résultats associés sont à interpréter avec prudence.

Concernant les données de Real Time Data, plusieurs ajustements ont également été nécessaires. Dans un premier temps, les variables « Distance par rapport au centre de la voie » et « Angle du volant » indiquaient à la fois la taille et la direction de l'écart. Autrement dit, un score inférieur à 0 indiquait que le conducteur s'écartait vers la gauche, tandis qu'un score supérieur à 0 indiquait que le participant s'écartait vers la droite. Pour notre étude, nous souhaitons uniquement savoir si le participant parvient à maintenir une trajectoire stable. Nous avons donc converti les données en valeurs absolues, afin de mesurer la taille de l'écart, sans prendre en compte sa direction. Nous avons aussi noté que la variable « Collisions » présentait initialement la valeur -1 en l'absence de collision, puis une valeur positive à chaque impact (cette valeur changeait à chaque nouvelle collision). Nous l'avons donc transformée en une variable binaire (0 = aucune collision ; 1 = collision). Toutefois, après vérification dans SAS Studio, elle s'est avérée presque constante selon les tâches, ne permettant pas d'obtenir une variance suffisante pour être analysée (T1 : 29% ; T2 : 87% ; T3 : 12%) . Elle a donc été exclue des analyses.

A la fin de ces étapes, nous avons obtenu un ensemble de données complet, que nous avons regroupé dans un dataset prêt à être analysé. Sur cette base, nous pouvons observer les statistiques descriptives de variables de notre étude pour avoir un premier aperçu des tendances globales. Le tableau 7 ci-dessous présente donc la moyenne et l'écart type de chacune de nos variables, selon la condition haptique (H = Avec retour haptique ; NH = Sans retour haptique).

Tableau 7. Statistiques descriptives des variables d'intérêt

Variable	Condition	T1		T2		T3	
		M	SD	M	SD	M	SD
Valence perçue	H	54.69	27.25	58.50	23.72	65.46	25.48
	NH	54.33	26.01	65.00	17.21	60.91	20.44
Activation perçue	H	59.76	17.55	75.25	10.72	63.76	19.42
	NH	57.75	21.62	62.92	16.45	74.00	12.79
Charge cognitive perçue	H	35.53	21.14	48.91	17.77	44.65	16.47
	NH	28.11	19.24	53.05	11.19	37.61	14.27
Performance perçue	H	4.41	1.46	4.36	1.27	4.69	1.44
	NH	4.58	2.01	4.94	0.95	4.69	1.10
Vitesse	H	4.59	0.84	5.91	2.28	4.78	1.21
	NH	4.67	0.56	6.45	2.28	4.55	1.10
Angle du volant	H	0.04	0.009	0.02	0.009	0.14	0.04
	NH	0.05	0.009	0.02	0.009	0.13	0.02
DTCV	H	0.23	0.03	0.13	0.07	-	-
	NH	0.23	0.03	0.15	0.04	-	-
Pédale de frein	H	0.09	0.06	0.13	0.03	0.06	0.03
	NH	0.09	0.04	0.10	0.04	0.05	0.02

En observant plus en avant la statistique descriptive de nos variables d'intérêt, les données nous montrent que T1 entraîne une charge cognitive moyenne plus faible que T2 et T3, aussi bien avec que sans retour haptique. En parallèle, nous constatons également que les participants déclarent avoir ressenti le plus de charge cognitive en T2, et ce, dans les deux conditions

haptiques. Cela nous permet de déterminer que le niveau de charge cognitive des participants entre les tâches se déroule comme suit : $T1 < T3 < T2$. En parallèle, nous constatons des tendances intéressantes sur l'intensité émotionnelle perçue. T1 enregistre les scores de valence et d'activation les plus faibles dans les deux conditions haptique. De plus, les écarts entre ces scores sont légers, ce qui nous laisse penser que le retour semble avoir peu d'effet sur l'intensité émotionnelle en T1. En T2 et T3, l'écart entre les conditions est plus marqué : en condition haptique, T3 présente le plus niveau de valence perçue, tandis que T2 prend cette place en condition sans haptique. En parallèle, T2 obtient le plus haut niveau d'activation avec haptique, et T3 sans haptique. Cependant, ces tendances descriptives ne permettent pas de conclure à des résultats définitifs. Des tests statistiques sont nécessaires pour déterminer la présence d'effets significatifs.

4.2 Tests d'hypothèse

Hypothèse 1 : Effet du retour haptique et intensité émotionnelle

Des régressions linéaires ont été menées pour analyser l'effet du retour haptique (VI) sur la valence et l'activation perçues (VD).

Les résultats ne révèlent aucun effet significatif du retour haptique sur la valence perçue (H1a). En revanche, un effet direct significatif du retour haptique sur l'activation perçue (H1b) a été constaté en T2 ($B = 12.31$, $SE B = 5.61$, $F(1, 23) = 4.83$, $p = .03$), indiquant une augmentation de l'activation en condition haptique.

H1a est donc non-soutenue, tandis que H1b est partiellement confirmée, car l'effet significatif est observé seulement dans une tâche sur trois.

Hypothèse 2 : Modération de la capacité d'inhibition émotionnelle inconsciente

Des régressions linéaires mixtes ont été menées afin d'analyser l'effet du retour haptique (VI) sur la valence et l'activation perçues (VD), en tenant compte de la capacité d'inhibition émotionnelle (Modération). Pour comprendre les analyses ci-dessous, rappelons qu'un haut score d'interférence émotionnelle renvoie à une faible capacité d'inhibition, et inversement.

Une tendance non significative a été observée en T2 ($B = -112.55$, $SE B = 68.31$, $F(1, 23) = 2.71$, $p = .11$), suggérant que l'effet du retour haptique sur la valence perçue (H2a) pourrait être modulé par la capacité d'inhibition émotionnelle. Cette interaction est illustrée plus en détail

dans la figure 5. L'axe horizontal représente le score d'interférence émotionnelle (où un score plus élevé correspond à une plus faible capacité d'inhibition), tandis que l'axe vertical représente la valence perçue. Les deux pentes opposées correspondent aux deux conditions haptiques : chez les individus présentant une forte capacité d'inhibition (faible interférence émotionnelle), la valence perçue tend à être plus élevée en présence du retour haptique. A l'inverse, elle apparaît plus élevée en l'absence de retour haptique chez ceux à faible inhibition (forte interférence émotionnelle). Aucun effet significatif ou tendance n'a été observé en T1 et T3.

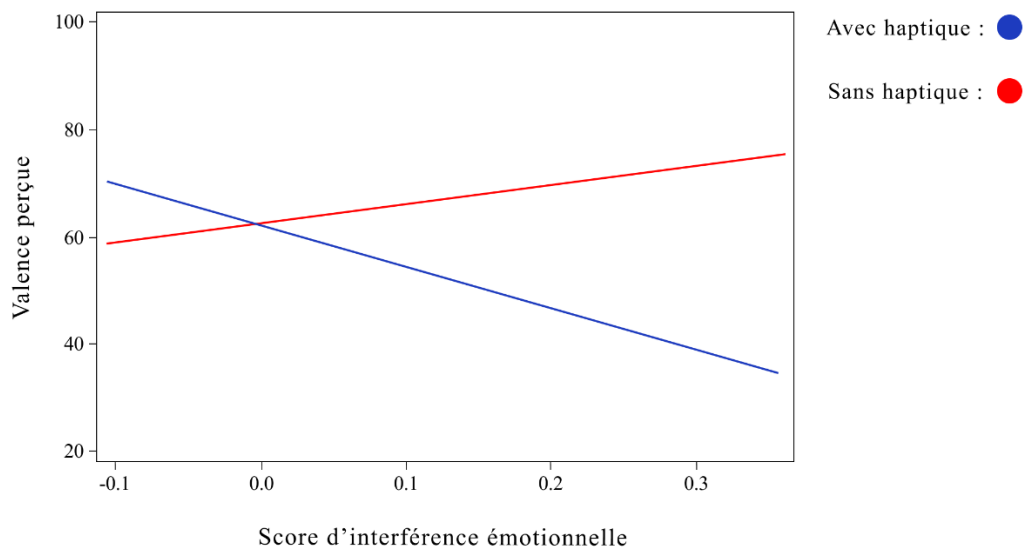


Figure 5. Effet modérateur de l'inhibition émotionnelle sur la relation entre le retour haptique et la valence en T2

En parallèle, un effet significatif de la modulation par l'inhibition émotionnelle sur l'activation perçue (H2b) est observé en T2 ($B = -102.91$, $SE B = 42.10$, $F(1, 23) = 5.97$, $p = .02$) et T3 ($B = 103.39$, $SE B = 48.80$, $F(1, 23) = 4.49$, $p = .04$). La figure 6 suit la même structure que la précédente. Les directions de ces effets diffèrent entre les tâches, illustrant une interaction inversée : en T2, le retour haptique augmente l'activation chez les individus à forte inhibition, et la réduit chez ceux qui inhibent peu. A l'inverse, en T3, il réduit l'activation chez ceux à forte inhibition, et l'augmente l'activation chez ceux à faible inhibition.

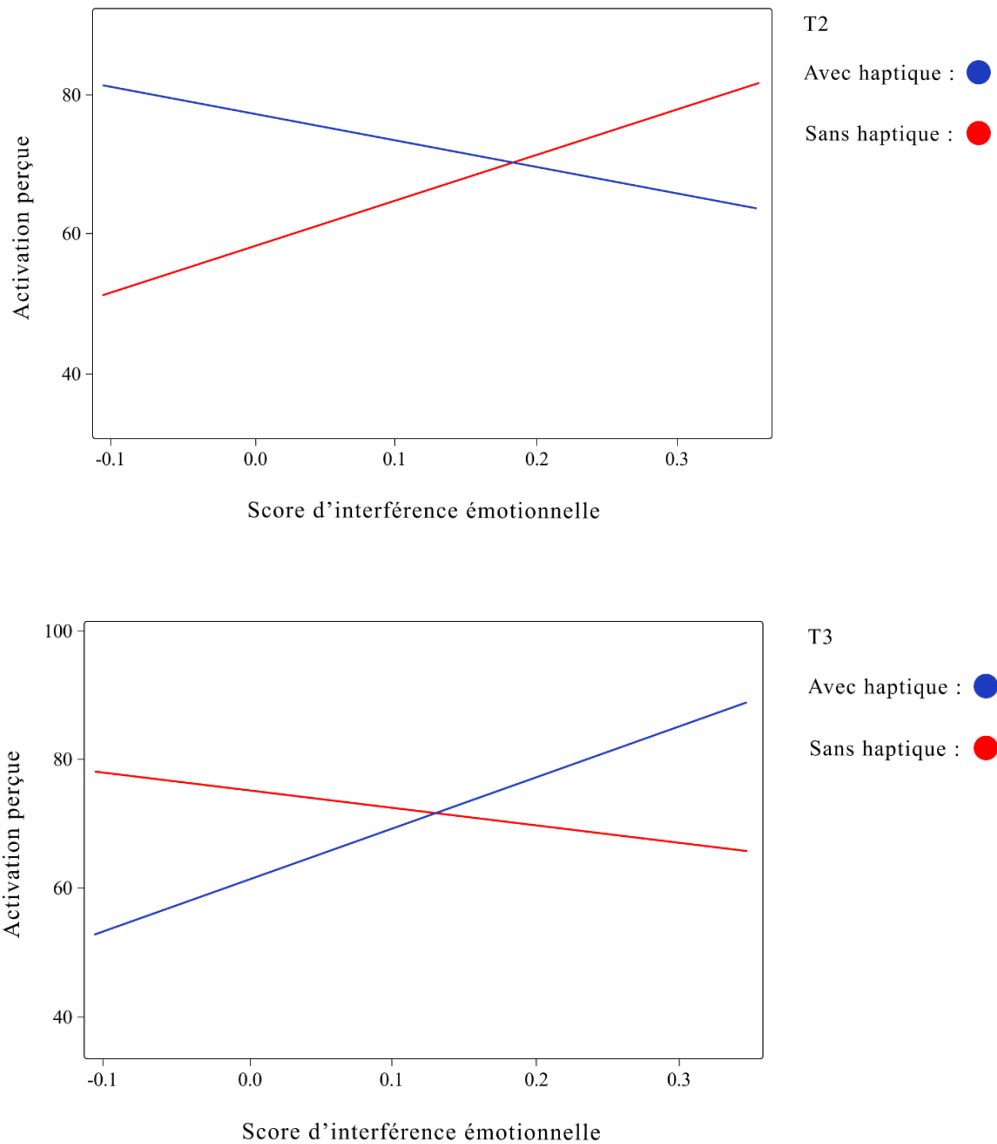


Figure 6. Effet modérateur de l'inhibition émotionnelle sur la relation entre le retour haptique et l'activation en T2 et T3

H2a est donc marginalement et partiellement confirmée, car on observe une tendance non-significative seulement dans une tâche. H2b est partiellement confirmée, car on trouve des effets significatifs pour deux tâches sur trois.

Hypothèse 3 : Modération de la charge cognitive

Des régressions linéaires mixtes ont été menées afin d'analyser l'effet du retour haptique (VI) sur la valence et l'activation perçues (VD), en tenant compte du niveau de charge cognitive (Modération).

Aucun effet significatif n'a été observé sur la valence perçue (H3a). En revanche, un effet significatif de la charge cognitive sur l'activation perçue (H3b) est constaté en T1 ($B = -0.93$, $SE B = 0.36$, $F(1, 23) = 6.68$, $p = .01$). La figure 7 ci-dessous suit la même logique que les précédentes. On observe qu'en l'absence de retour haptique, la charge cognitive perçue augmente en même temps que l'activation : plus les participants se sentent mentalement sollicités, plus leur niveau d'activation est élevé. Cette tendance s'inverse en présence du retour haptique, qui augmente l'activation chez les individus rapportant une faible charge cognitive, et la réduit chez ceux qui se sentent plus surchargés.

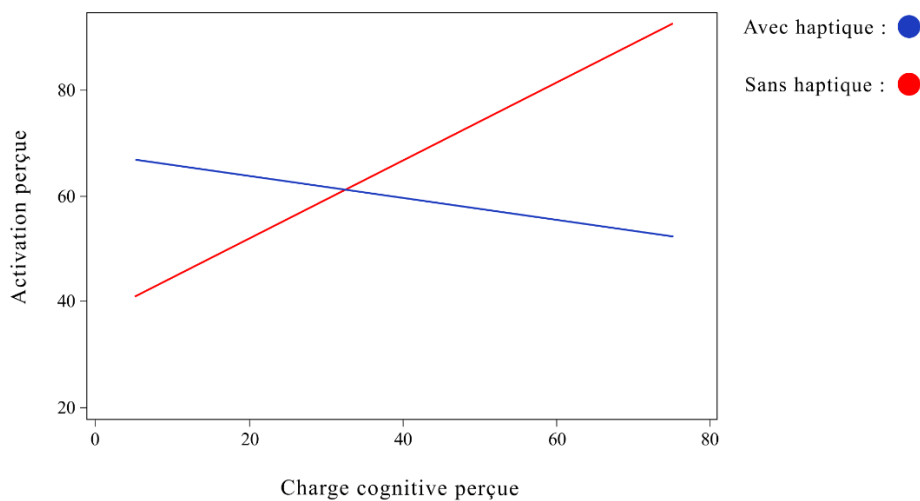


Figure 7. Effet modérateur de la charge cognitive sur la relation entre le retour haptique et l'activation en T1

H3a n'est donc pas soutenue, tandis que H3b l'est partiellement, car l'effet est trouvé pour une tâche sur trois.

Hypothèse 4 : Effet de l'intensité émotionnelle sur la performance

En utilisant à nouveau des régressions linéaires, nous avons analysé l'effet de l'intensité émotionnelle (VI) sur les différentes mesures de performance (VD).

Concernant la valence perçue (H4a), des effets directs significatifs sur la performance perçue ont été trouvés pour l'ensemble des tâches, T1 ($B = 0.04$, $SE B = 0.008$, $F(1, 23) = 30.50$, $p < .001$), T2 ($B = 0.02$, $SE B = 0.01$, $F(1, 23) = 5.04$, $p = .03$) et T3 ($B = 0.03$, $SE B = .008$, $F(1, 23) = 24.04$, $p < .001$). Ces résultats indiquent qu'une valence plus positive est associée à une meilleure performance perçue sur l'ensemble des contextes de conduite étudiés. En termes de performance réelle, les résultats apparaissent plus nuancés. En T1, la valence perçue présente

une tendance négative marginale sur la position de la pédale de frein ($B = -0.0007$, $SE B = 0.0003$, $F(1, 23) = 3.37$, $p = .08$), suggérant qu'une valence plus positive pourrait tendre à réduire la pression exercée sur la pédale. En T3, la valence a un effet positif significatif sur la vitesse moyenne ($B = 0.02$, $SE B = 0.009$, $F(1, 23) = 5.89$, $p = .02$). Ces résultats indiquent qu'une valence plus positive est associée à une conduite plus rapide en T3. En revanche, aucun effet significatif de l'activation perçue (H4b) n'a été constaté sur les mesures de performance.

Ainsi, H4a est partiellement et marginalement confirmée, car on trouve différents effets dans toutes les tâches, dont un étant une tendance non-significative. H4b n'est quant à elle pas soutenue.

Hypothèse 5 : Modération de la régulation émotionnelle

Des régressions linéaires mixtes ont été menées afin d'analyser l'effet de l'intensité émotionnelle (VI) sur la performance (VD), en tenant compte des niveaux de réévaluation et suppression émotionnelles (Modération).

En T1, une interaction significative entre la réévaluation émotionnelle et la valence perçue est observée sur l'angle du volant ($B = .0001$, $SE B = .00$, $F(1, 23) = 8.58$, $p = .008$). La figure 8 illustre plus finement cette interaction entre ces trois variables. L'axe horizontal représente la valence perçue, et l'axe vertical le niveau de réévaluation émotionnelle. Comme on peut l'observer sur le côté gauche de la carte de chaleur, la réévaluation semble atténuer la variabilité de l'angle du volant lorsque la valence est faible. À l'inverse, lorsque la valence est plus élevée sur le côté droit, l'angle reste globalement moins écarté, mais une réévaluation plus importante semble entraîner une légère augmentation de la variabilité.

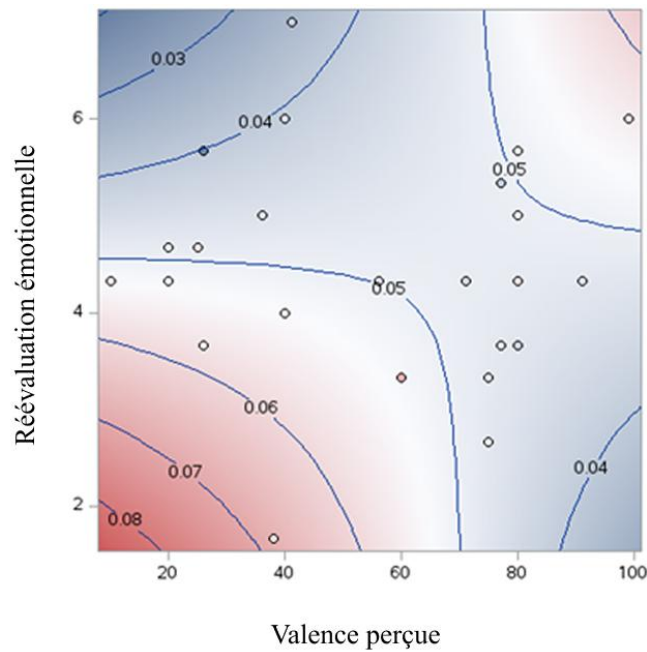


Figure 8. Effet modérateur de la réévaluation émotionnelle sur la relation entre la valence et l'angle du volant en T1

Note. Les zones rouges indiquent les valeurs élevées, les zones bleues les valeurs basses.

En T2, cette même interaction influence marginalement la vitesse moyenne ($B = -0.04$, $SE B = 0.02$, $F(1, 23) = 3.56$, $p = .07$) ainsi que la DTCV ($B = -.001$, $SE B = .0006$, $F(1, 23) = 3.54$, $p = .07$). Ainsi, en T2, la réévaluation peut moduler la relation entre la valence et la vitesse. Comme l'illustre la figure 9, lorsque la valence est faible, une réévaluation plus élevée est associée à des vitesses plus importantes. A mesure que la valence augmente, la réévaluation tend à réduire la vitesse moyenne. En parallèle, la figure 10 montre que la DTCV tend à être plus faible quand la valence et la réévaluation émotionnelle sont faibles en T2, indiquant une conduite plus stable. A l'inverse, la DTCV tend à être plus élevée quand la réévaluation et la valence sont fortes. En parallèle, aucun effet modérateur de la régulation émotionnelle sur l'activation n'a été trouvé.

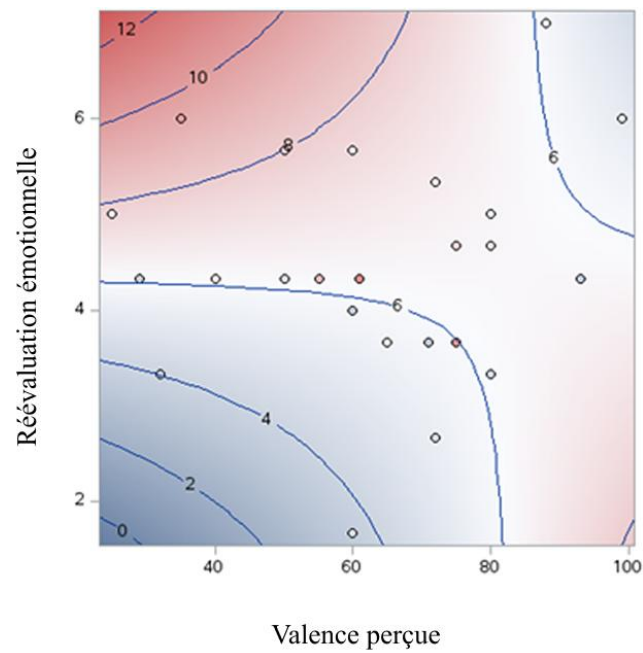


Figure 9. Effet modérateur de la réévaluation émotionnelle sur la relation entre la valence et la vitesse en T2

Note. Les zones rouges indiquent les valeurs élevées, les zones bleues les valeurs basses.

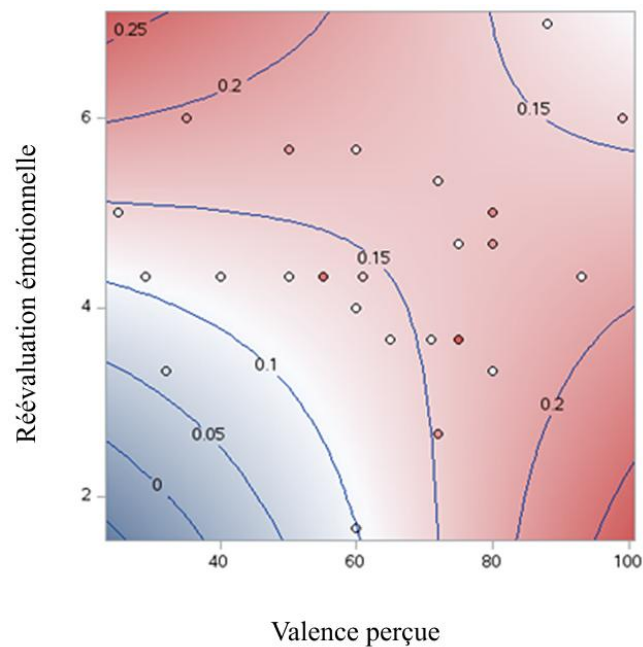


Figure 10. Effet modérateur de la réévaluation émotionnelle sur la relation entre la valence et DTCV en T2

Note. Les zones rouges indiquent les valeurs élevées, les zones bleues les valeurs basses.

H5a est partiellement et marginalement soutenue, car les effets sont trouvés pour deux tâches sur trois, tandis que H5b est non-soutenue.

4.3 Synthèse des résultats statistiques

En raison du nombre important de résultats, nous présentons ici une synthèse écrite, présentée dans le tableau 8. Toutefois, un tableau correspondant avec les données chiffrées se trouve en annexe (*Annexe C – C1*).

Tableau 8. Synthèse des résultats significatifs par tâche

Hypothèse	T1	T2	T3	Statut global
H1a – Haptique > Valence	X	X	X	Non-soutenue
H1b – Haptique > Activation	X	Soutenue	X	Partiellement
H2a – Haptique X Inhibition > Valence	X	Marginal	X	Partiellement et marginalement
H2b – Haptique X Inhibition > Activation	X	Soutenue	Soutenue	Partiellement
H3a – Haptique X Charge cognitive > Valence	X	X	X	Non-soutenue
H3b – Haptique X Charge cognitive > Activation	Soutenue	X	X	Partiellement
H4a – Valence > Performance	Partiel et marginal	Partiel	Partiel	Partiellement et marginalement
H4b – Activation > Performance	X	X	X	Non-soutenue
H5a – Valence X Régulation > Performance	Partiel	Partiel et marginal	X	Partiellement et marginalement
H5b – Activation X Régulation > Performance	X	X	X	Non-soutenue

Note. « X » signifie que l'hypothèse est non-soutenue pour la tâche spécifique. Un statut global noté « partiellement » indique que l'hypothèse est soutenue pour une ou deux tâches sur les trois. Le terme « marginalement » signifie qu'un effet est proche du seuil.

La figure 11 ci-dessous illustre ces effets. En raison de la variété d'unités de mesure mobilisées dans cette étude, les coefficients présentés sont non-standardisés. Du fait de la numérosité des données, seuls les effets significatifs les plus robustes observés parmi les trois tâches sur chaque relation testée sont présentés. Des tableaux récapitulatifs contenant l'entièreté de résultats par tâche peuvent être trouvés en Annexe (*Annexe C - C2, C3, C4*).

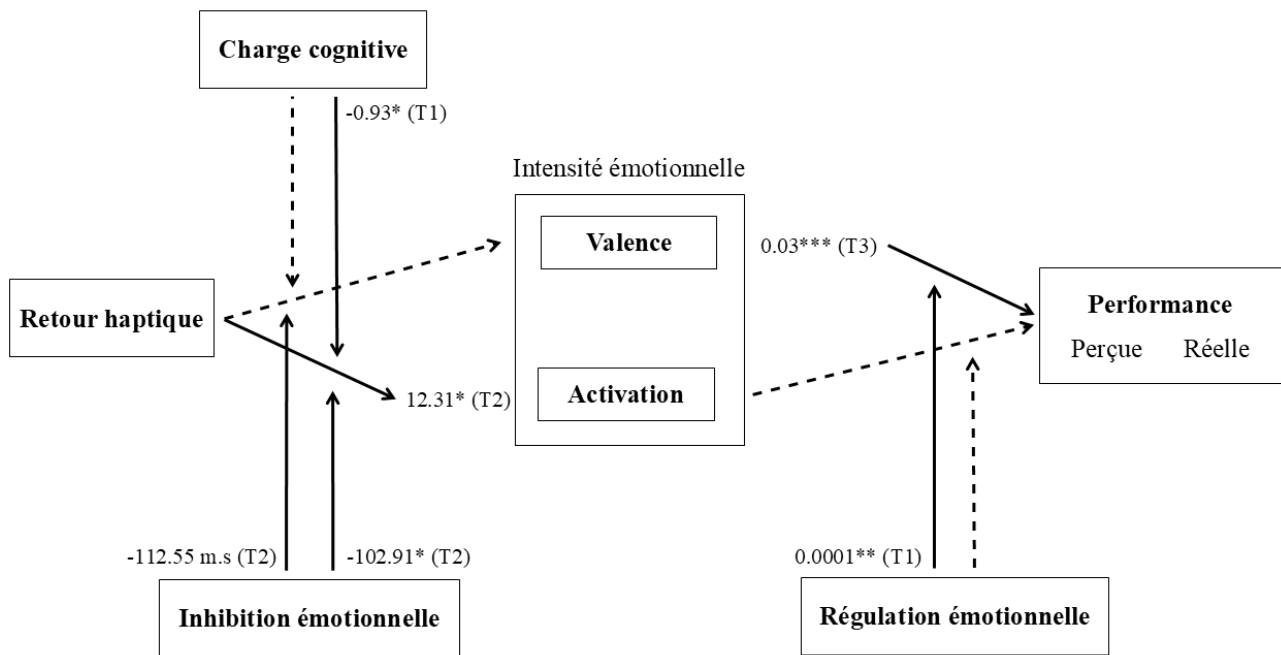


Figure 11. Modèle de recherche validé, montrant les effets les plus forts pour les relations testées

Note. Les lignes solides indiquent que l'hypothèse est supportée complètement, partiellement ou marginalement (pour au moins une des tâches). Les lignes pointillées indiquent que l'hypothèse est non-supportée dans toutes les tâches. *T1* renvoie à la conduite régulière, *T2* à la conduite multitâche et *T3* à la conduite en slaloms. Les étoiles ont la signification suivante : * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

4.4 Synthèse des résultats comportementaux

Pour expliquer de façon plus concrète les résultats statistiques présentés ci-dessus, le tableau 9 synthétise les effets constatés entre nos différentes variables.

Tableau 9. Synthèse des résultats comportementaux par tâche

T1 – Conduite régulière
- Le retour haptique augmente l'activation chez les moins chargés cognitivement. - La valence perçue augmente la performance perçue. - La valence tend à réduire la pression sur la pédale de frein. - La réévaluation réduit l'angle du volant chez ceux à faible valence, et a peu d'effet chez ceux à forte valence.

T2 – Conduite multitâche
- Le retour haptique augmente l'activation. - Le retour haptique tend à augmenter la valence des plus inhibés. - Le retour haptique augmente l'activation des plus inhibés. - La valence perçue augmente la performance perçue. - La réévaluation augmente la vitesse chez ceux à faible valence, et la diminue chez ceux à forte valence. - La réévaluation augmente la DTCV chez les individus à faible valence, et a peu d'effet chez ceux à forte valence.
T3 – Conduite en slaloms
- Le retour haptique augmente l'activation des moins inhibés. - La valence perçue augmente la performance perçue. - La valence augmente la vitesse.

5. Discussion

5.1 Résumé des résultats

En guise de rappel, cette étude s'intéresse à la place du retour haptique dans les simulateurs de conduite, aujourd'hui essentiels pour former les individus. Il a été observé que ce dernier peut influencer la performance, mais que cet effet et les facteurs émotionnels susceptibles de l'influencer demeurent peu compris. L'objectif de cette étude est donc d'évaluer l'influence des mécanismes de gestion émotionnels, conscients et inconscients, sur la relation entre le retour haptique et la performance.

Dans cette perspective, les résultats laissent entrevoir que le retour haptique semble avoir un moindre effet sur la valence perçue, mais pourrait exercer une influence plus prononcée sur l'activation perçue. Toutefois, ces effets ne semblent pas universels : ils varient entre les trois contextes de conduite, et semblent dépendre de la capacité d'inhibition émotionnelle et du niveau de charge cognitive des participants. Ces effets demeurent très hétérogènes, suggérant que le retour haptique peut être perçu plus ou moins positivement, et susciter un degré d'activation plus ou moins élevé. En parallèle, les résultats suggèrent que l'intensité émotionnelle pourrait influencer la performance : une valence perçue plus élevée tend à être associée à une hausse de la performance perçue dans toutes les tâches, laissant penser qu'une plus grande positivité conduit à une performance perçue plus élevée. Les effets sur la performance réelle sont plus nuancés : la valence semble générer des effets fortement

dépendants de la stratégie de réévaluation émotionnelle, tandis qu'aucun effet n'est observé pour la suppression et l'activation.

Dans leur globalité, ces résultats suggèrent que les réactions émotionnelles pourraient influencer l'effet du retour haptique sur la performance. Toutefois, cet effet semble dépendre du contexte de conduite et des stratégies émotionnelles mobilisées par les conducteurs.

5.2 Implications théoriques

5.2.1 Effet du retour haptique sur l'intensité émotionnelle et importance des modérateurs

Cette étude contribue à plusieurs théories évoquées précédemment, notamment celle de James-Lange (1884/1994). En effet, les résultats suggèrent que les changements corporels engendrés par le retour haptique semblent influencer les réactions émotionnelles, mais apportent une nuance selon laquelle ces effets pourraient se manifester différemment entre les conducteurs et les tâches. Plus précisément, en contexte multitâche, les participants ayant une capacité d'inhibition plus élevée pourraient tendre à percevoir le retour haptique plus positivement, tandis que ceux avec une capacité d'inhibition plus faible pourraient le percevoir plus négativement. Cette différence corrobore certaines études récentes, qui montrent que le signal peut être perçu comme trop intense pour certains, mais qu'il peut accentuer le confort pour d'autres (Huo et al., 2024 ; Alotaibi et al., 2022). De plus, l'absence d'effet en conduite régulière et en slaloms semble suggérer que ces influences ne sont pas uniformes dans tous les contextes de conduite, ce que d'autres études ont aussi constaté (Huo et al., 2024). Cette variabilité entre les tâches suggère que l'effet du retour haptique dépend fortement du contexte de conduite et des ressources attentionnelles. Dans des tâches pouvant être plus exigeantes comme la conduite multitâches, les conducteurs doivent répartir leurs ressources entre plusieurs sources d'information, ce qui peut modifier la manière dont les signaux haptiques sont perçus. À l'inverse, dans certaines tâches aux contextes plus simples, comme la conduite régulière, les signaux peuvent être moins déterminants dans l'expérience émotionnelle.

En parallèle, les effets observés sur l'activation semblent fortement dépendre des modérateurs, mais aussi beaucoup varier entre les tâches. En conduite multitâche, l'activation tend à augmenter chez les plus inhibés, et à diminuer chez les moins inhibés. En conduite en slaloms, cette dynamique s'inverse : le retour haptique augmente l'activation chez les moins inhibés, et à la réduit chez les plus inhibés. Ces résultats s'alignent avec la théorie du contrôle attentionnel (Eysenck et al., 2007), selon laquelle la capacité d'inhibition peut favoriser une régulation

efficace des émotions, mais soulèvent que cet effet pourrait évoluer dans le temps. Bien que les résultats apparaissent opposés entre les deux tâches, ils ne sont pas contradictoires : ils s'inscrivent dans la continuité de plusieurs travaux montrant différents facteurs pouvant impacter ce type de relation, notamment la temporalité. En effet, certains auteurs indiquent que l'effet de l'activation peut fluctuer en fonction de la période d'adaptation nécessaire pour se stabiliser face au retour haptique (Liu et al., 2025; Yao & Xu, 2024). Dans cette perspective, une explication possible pourrait être la suivante : en conduite multitâche, les conducteurs plus inhibés pourraient traverser une phase initiale où le retour haptique stimule leur vigilance et augmente le niveau d'activation. Les moins inhibés pourraient percevoir le retour haptique comme intrusif, entraînant une surcharge émotionnelle et un désengagement attentionnel, pouvant ainsi réduire leur activation (Eysenck et al., 2007). En passant à la conduite en slaloms, les plus inhibés pourraient avoir passé la phase d'adaptation, et trouvé un équilibre entre le retour haptique et leurs réactions, résultant en une régulation plus efficace de leurs émotions. Le retour haptique pourrait alors conférer une sensation de conduite plus apaisée (Béquet, 2023). A l'inverse, les moins inhibés pourraient avoir besoin de plus de temps pour s'adapter : le retour haptique serait trop intense, ce qui générerait une forte charge attentionnelle et une réactivité excessive, menant à une hausse de l'activation (Eysenck et al., 2007). Cette interaction inversée est cohérente avec les travaux de Albert et al. (2010), qui montrent que le contexte émotionnel peut affecter l'inhibition différemment selon les individus. Ces différences soulignent que les interactions observées ne doivent pas être interprétées comme des tendances universelles du retour haptique, mais plutôt comme des dynamiques dépendantes du contexte expérimental et des caractéristiques individuelles des conducteurs.

Notre étude contribue aussi à la théorie de la charge cognitive (Sweller, 1988), qui stipule que les ressources mentales disponibles sont limitées, et qu'une surcharge peut se produire quand cette limite dépassée. Les résultats semblent à la fois appuyer et prolonger cette perspective, en montrant que la modération par la charge cognitive perçue présente un effet spécifique pour le contexte de conduite régulière. Sans retour haptique, l'activation et la charge cognitive semblent augmenter ensemble, ce qui est cohérent avec plusieurs travaux, montrant que ces deux variables ont tendance à évoluer en même temps (Engström et al., 2017). Toutefois, la présence du retour haptique tend à inverser cet effet : l'activation diminue chez les conducteurs rapportant une charge cognitive élevée, et augmente chez ceux rapportant une charge plus faible. Ce résultat permet approfondir la théorie, en suggérant que ces dynamiques peuvent signifier une surcharge cognitive plus spécifiquement lorsque le retour haptique n'est pas

adapté aux exigences de la tâche, notamment en contexte de conduite régulière. Certains travaux ont constaté des tendances similaires (Van Dillen et al., 2009), qui suggèrent que le retour haptique peut varier, et ne pas être approprié à certains contextes (Paas & Sweller, 2012; Maranges et al., 2017).

5.2.2 Lien entre intensité émotionnelle et performance

En nous appuyant sur le modèle de Russell (1980), nos résultats suggèrent que la valence pourrait influencer la performance, tandis qu'aucun effet de l'activation n'est observé. Ce constat indique que cette étude ne permet pas d'approfondir la théorie de Yerkes & Dodson (1908). En parallèle, les résultats semblent éclairer la théorie de la régulation émotionnelle (Gross, 1998), en mettant en évidence le rôle modérateur prononcé d'une stratégie spécifique de régulation. Ainsi, cette étude contribue à développer l'effet conjoint de la valence et la régulation émotionnelle sur la performance.

Nous avons d'abord observé un effet commun de la valence sur la performance perçue dans les trois tâches : une valence plus positive est associée à une performance perçue plus élevée. Cet effet s'inscrit dans la continuité de la littérature, qui suggère majoritairement qu'une valence plus élevée tend à augmenter la performance (Beaudry & Pinsonneault, 2005). En revanche, les effets de la valence sur la performance réelle se sont avérés plus variés. Cela concorde avec plusieurs travaux expliquant que l'influence de la valence sur la performance peut être hétérogène, notamment en raison de différents facteurs d'influence, tels que la régulation émotionnelle (Jeon et al., 2014). La présence de certains effets marginaux suggère que ces relations pourraient exister, mais se manifester différemment selon les contextes de conduite et les indicateurs de performance considérés. Ces tendances sont donc à interprétées avec prudence, et pourraient être explorées plus en profondeur dans de futures recherches. Pour simplifier la compréhension des résultats, les effets seront examinés tâche par tâche.

En contexte de conduite régulière, une valence perçue positive tend tout d'abord à réduire la pression sur la pédale de frein. Or, une pression plus faible est généralement associée à une conduite plus souple et plus adaptée (Bosurgi et al., 2025). Cette observation suggère donc que la valence pourrait contribuer à une meilleure performance en contexte de conduite régulière. En ajoutant la modulation par réévaluation émotionnelle, des effets plus détaillés apparaissent : la réévaluation semble être associée à une réduction de l'angle du volant chez les conducteurs rapportant une faible valence, tandis qu'elle a peu d'effet apparent chez ceux présentant une valence élevée, qui ne semblent pas marquer un grand écart dans l'angle du volant. Pour rappel,

une réduction de l'angle du volant indique généralement une plus grande stabilité (Green, 2007). Ces effets sont cohérents avec la théorie de la régulation émotionnelle (Gross & John, 2003), qui explique que la réévaluation tend à être une stratégie efficace, qui réduit les émotions négatives en faveur des émotions positives. Ainsi, cette stratégie ne semble pas affecter le conducteur, mais a plutôt tendance à l'aider à s'adapter.

En conduite multitâche, aucun effet direct de la valence n'a été observé sur la performance réelle. Toutefois, en intégrant la réévaluation émotionnelle dans le modèle, une interaction apparaît : la réévaluation semble être associée à une augmentation de la vitesse chez ceux à faible valence, tandis qu'elle tend à la réduire chez ceux présentant une valence plus élevée. Cette variable nécessite d'être associée à d'autres, afin de déterminer si l'issue est positive ou non. Nous avons constaté une tendance sur la DTCV : la réévaluation semble augmenter la distance au centre de la voie chez les individus à faible valence. En parallèle, la DTCV est élevée quand ces deux dimensions sont fortes. Ces résultats semblent plus contrastés que ceux de la tâche précédente, et indiquent que la valence, mais aussi la stratégie de régulation étudiée, pourraient affecter la performance dans certains contextes. Ici, les résultats appuient les nuances apportées émotionnelle quelques années plus tard par le concepteur de la théorie de régulation, expliquant que, bien que la réévaluation démontre souvent des effets positifs chez les individus, ces derniers ne sont pas universels et peuvent parfois même être contreproductifs (Gross, 2015).

En conduite de slaloms, une valence perçue plus positive est associée à une augmentation de la vitesse. S'agissant de la seule mesure présentant un effet observable, nous ne pouvons pas déterminer la performance entière sur cette tâche, ni tirer de conclusion globale. Par ailleurs, la stratégie de suppression émotionnelle n'a pas montré aucun effet significatif, ne fournissant pas d'indication quant à sa potentielle influence sur l'effet de l'intensité émotionnelle sur la performance.

5.2.3 Synthèse globale

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en lumière que le rôle du retour haptique dépend fortement des mécanismes émotionnels et du type de tâche. Cette variabilité entre les tâches confirme que les effets observés ne sont pas uniformes et souligne l'importance d'analyser les interactions entre technologies, contexte de conduite et différences individuelles. Plus précisément, le retour haptique tend à influencer davantage l'activation que la valence, et ces effets varient selon la capacité d'inhibition émotionnelle et le niveau de charge cognitive.

Concrètement, un même signal haptique peut être considéré à la fois intrusif et stimulant selon l'état émotionnel des individus. En parallèle, la valence semble jouer un rôle clé dans la performance, notamment la performance perçue : dans tous les contextes de conduite étudiés, plus un conducteur ressent des émotions positives, plus il aura tendance à considérer sa performance comme élevée. A l'inverse, l'activation et la stratégie de suppression émotionnelle ne semblent pas avoir un impact déterminant sur la performance des individus. Toutefois, les conducteurs plus enclins à réévaluer leurs émotions s'adaptent davantage, influençant leur performance plus ou moins positivement selon la tâche. Ainsi, cette étude souligne que le retour haptique ne peut être manipulé efficacement sans considérer les différences entre conducteurs et contextes d'utilisation. Elle s'aligne avec la littérature, qui confirme que l'étude des émotions et des fonctionnalités technologiques, comme le retour haptique, peut être complexe, car fortement dépendante du contexte et des différences individuelles.

5.3 Implications managériales

Cette étude a permis de souligner l'importance de la compréhension des individus en simulation de conduite. A travers nos résultats, nous avons été en mesure de constater qu'ils ne réagissent pas tous de la même façon au retour haptique, notamment en raison des mécanismes de gestion émotionnelle.

Dans un contexte de formation, ces réflexions poussent à réfléchir à une approche plus personnalisée et centrée sur l'humain. En considérant les différences d'adaptation émotionnelle, des programmes personnalisés pourraient être développés en fonction du profil des individus. Cela passerait à la fois par le choix et la structure des tâches, mais aussi par une manipulation plus souple de la présence haptique. Par exemple, pour les conducteurs professionnels nécessitant une conduite rapide et efficace dans des contextes d'urgence, un conducteur avec une faible capacité d'inhibition pourrait avoir tendance à percevoir le retour haptique comme une charge supplémentaire. Cela pourrait avoir tendance à nuire à ses réactions au volant et à sa performance. Une solution envisageable pour optimiser sa formation pourrait être de débiter par une tâche moins lourde cognitivement et sans retour haptique, pour l'ajouter une fois que le conducteur s'améliore et que le niveau de difficulté des tâches augmente. De cette façon, le conducteur pourrait se former aux bons réflexes routiers, mais aussi faire du retour haptique une valeur ajoutée.

A travers une vision intégrant à la fois la compréhension des profils émotionnels, la personnalisation des tâches et une calibration cohérente du signal, les programmes de formation

pourraient proposer une expérience plus adaptée à chaque conducteur. Le retour haptique serait ainsi mieux compris et plus efficace dans les formations de conduite, s'alignant avec les objectifs et mesures de sécurité routière mis en place pour particuliers et professionnels évoqués dans l'introduction de cet article.

5.4 Limites et pistes futures

Bien que cette étude ait permis d'évaluer la place des émotions dans différents contextes de conduite et d'obtenir des résultats qui appuient des travaux existants, certains choix méthodologiques ont pu entraîner quelques limites. Ces dernières permettent, toutefois, d'ouvrir des pistes de réflexion pour les recherches futures.

Nous avons recruté 25 conducteurs pour participer à cette étude, afin de nous aligner avec les recherches similaires, tout en tenant compte de la durée relativement longue du protocole. Cet effectif correspondait à la dimension exploratoire de ce projet, permettant de constater des tendances initiales. Toutefois, cette taille d'échantillon a pu réduire la puissance statistique et masquer certains effets. Elle a aussi limité l'intégration de variables de contrôle qui auraient pu enrichir l'analyse, telles que la familiarité avec le simulateur ou l'expérience de conduite. Les prochaines études pourraient élargir et diversifier l'échantillon, afin d'améliorer la portée des résultats et identifier de nouveaux effets explicatifs. De la même façon, une version restreinte de l'ERQ, composée de six items, a été utilisée. Cette décision visait à réduire la charge du protocole, tout en conservant la mesure séparée des deux stratégies de régulation émotionnelle. Bien que le niveau de fiabilité ait été suffisant pour mener les analyses (section 4.1), l'échelle a tout de même pu être affectée. Il serait donc pertinent d'utiliser le questionnaire complet lors de prochaines recherches. De plus, l'intégration de mesures physiologiques complémentaires permettrait d'enrichir la compréhension de la régulation émotionnelle en simulation de conduite avec haptique. Finalement, afin d'éviter des confusions dans la randomisation et de conserver une structure dans le protocole, les trois tâches ont été présentées dans le même ordre pour tous les participants. Ce choix a toutefois pu générer des états de fatigue ou des effets d'apprentissages, et a pu restreindre la portée des conclusions à trois contextes de conduite spécifiques. Les travaux futurs pourraient tester un ordre plus varié, mais aussi inclure de nouveaux contextes de conduite afin de mieux isoler les effets du retour haptique et observer les effets de notre étude plus largement dans d'autres contextes.

6. Conclusion

Cette étude visait à répondre à la question suivante : *dans quelle mesure la régulation émotionnelle, l'inhibition émotionnelle et la charge cognitive modèrent-elles l'effet de l'haptique sur la performance en simulation de conduite ?* Notre étude suggère que les émotions et leur régulation sont essentielles, car elles semblent moduler l'effet du retour haptique sur la performance, dépendamment de la tâche. La variété des effets observés laisse penser que, bien que la compréhension des individus soit complexe et nuancée, les mécanismes émotionnels pourraient jouer un rôle clé. Ils pourraient améliorer l'intégration des réactions individuelles et des perceptions du retour haptique. Ces constats ouvrent la voie à une formation plus personnalisée, adaptée à la fois au contexte et à l'individu. En répartissant les participants selon leur niveau et leur type de régulation émotionnelle, il serait possible de les confronter à des situations plus pertinentes. Au-delà de l'effet formateur, cette approche permettrait aussi de contribuer à l'enjeu plus large de la sécurité routière.

Références

- Albert, J., López-Martín, S., & Carretié, L. (2010). Emotional context modulates response inhibition : Neural and behavioral data. *NeuroImage*, 49(1), 914-921.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.08.045>
- Alotaibi, Y., Williamson, J. H., & Brewster, S. A. (2022). First Steps Towards Designing Electrotactons : Investigating Intensity and Pulse Frequency as Parameters for Electrotactile Cues. *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-11.
<https://doi.org/10.1145/3491102.3501863>
- Battaglia, S., Serio, G., Scarpazza, C., D'Ausilio, A., & Borgomaneri, S. (2021). Frozen in (e)motion : How reactive motor inhibition is influenced by the emotional content of stimuli in healthy and psychiatric populations. *Behaviour Research and Therapy*, 146, 103963. <https://doi.org/10.1016/j.brat.2021.103963>
- Beaudry, A., & Pinsonneault, A. (2005). Understanding User Responses to Information Technology : A Coping Model of User Adaptation. *MIS Quarterly*, 29(3), 493.
<https://doi.org/10.2307/25148693>
- Ben-Haim, M. S., Williams, P., Howard, Z., Mama, Y., Eidels, A., & Algom, D. (2016). The Emotional Stroop Task : Assessing Cognitive Performance under Exposure to Emotional Content. *Journal of Visualized Experiments*, 112, 53720.
<https://doi.org/10.3791/53720>
- Benloucif, M. A., Sentouh, C., Floris, J., Simon, P., & Popieul, J.-C. (2019). Online adaptation of the Level of Haptic Authority in a lane keeping system considering the driver's state. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 61, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.08.013>
- Béquet, A. J. (2023). *Etude du stress et de sa régulation en contexte de conduite autonome à l'aune des différences individuelles*. [Thèse de doctorat, Université Lyon II]. HAL.
<https://theses.hal.science/tel-04146982v1/document>
- Betella, A., & Verschure, P. F. M. J. (2016). The Affective Slider : A Digital Self-Assessment Scale for the Measurement of Human Emotions. *PLOS ONE*, 11(2), e0148037. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148037>
- Blanke, E. S., Bellingtier, J. A., Riediger, M., & Brose, A. (2022). When and How to Regulate : Everyday Emotion-Regulation Strategy Use and Stressor Intensity. *Affective Science*, 3(1), 81-92. <https://doi.org/10.1007/s42761-021-00087-1>

- Bosurgi, G., Pellegrino, O., Sollazzo, G., & Ruggeri, A. (2025). Performance indexes for characterizing driving behavior. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, S2095756425001576. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.10.004>
- Bowers, A. R., Mandel, A. J., Goldstein, R. B., & Peli, E. (2010). Driving with Hemianopia, II : Lane Position and Steering in a Driving Simulator. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 51(12), 6605. <https://doi.org/10.1167/iovs.10-5310>
- Cheng, X., Geng, X., Huang, Y., & Burdet, E. (2025). Haptic Feedback of Front Vehicle Motion May Improve Driving Control. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 10(1), 343-349. <https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3502063>
- Crandall, R., & Karadoğan, E. (2021). Designing Pedagogically Effective Haptic Systems for Learning : A Review. *Applied Sciences*, 11(14), 6245. <https://doi.org/10.3390/app11146245>
- De Bonis, M. (1968). La loi de Yerkes-Dobson : Problèmes méthodologiques liés à sa vérification. *L'année psychologique*, 68(1), 121-141. <https://doi.org/10.3406/psy.1968.27601>
- Du, N., Zhou, F., Pulver, E. M., Tilbury, D. M., Robert, L. P., Pradhan, A. K., & Yang, X. J. (2020). Examining the effects of emotional valence and arousal on takeover performance in conditionally automated driving. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 112, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.006>
- Engström, J., Markkula, G., Victor, T., & Merat, N. (2017). Effects of Cognitive Load on Driving Performance : The Cognitive Control Hypothesis. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 59(5), 734-764. <https://doi.org/10.1177/0018720817690639>
- Eysenck, M. W., Derakshan, N., Santos, R., & Calvo, M. G. (2007). Anxiety and cognitive performance : Attentional control theory. *Emotion*, 7(2), 336-353. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.7.2.336>
- Feenstra, P., Van Der Horst, R., Grácio, B. J. C., & Wentink, M. (2010). Effect of Simulator Motion Cuing on Steering Control Performance : Driving Simulator Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2185(1), 48-54. <https://doi.org/10.3141/2185-07>
- Green, P. (2007, juillet 11). Why Driving Performance Measures Are Sometimes Not Accurate (and Methods to Check Accuracy). *Driving Assessment Conference 2007*. Driving Assessment Conference 2007. <https://doi.org/10.17077/drivingassessment.1267>

- Gross, J. J. (1998). Antecedent- and response-focused emotion regulation: Divergent consequences for experience, expression, and physiology. *Journal of Personality and Social Psychology*, 74(1), 224-237. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.74.1.224>
- Gross, J. J. (2015). Emotion Regulation : Current Status and Future Prospects. *Psychological Inquiry*, 26(1), 1-26. <https://doi.org/10.1080/1047840X.2014.940781>
- Gross, J. J., & John, O. P. (2003). Individual differences in two emotion regulation processes : Implications for affect, relationships, and well-being. *Journal of Personality and Social Psychology*, 85(2), 348-362. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.85.2.348>
- Gupta, R., Hur, Y.-J., & Lavie, N. (2016). Distracted by pleasure : Effects of positive versus negative valence on emotional capture under load. *Emotion*, 16(3), 328-337. <https://doi.org/10.1037/emo0000112>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload* (pp. 139–183). North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Holman, A. C., & Popușoi, S. A. (2020). How You Deal with Your Emotions Is How You Drive. Emotion Regulation Strategies, Traffic Offenses, and the Mediating Role of Driving Styles. *Sustainability*, 12(12), 4929. <https://doi.org/10.3390/su12124929>
- Huo, F., Wang, T., Fang, F., & Sun, C. (2024). The influence of tactile feedback in In-vehicle central control interfaces on driver emotions : A comparative study of touchscreens and physical buttons. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 101, 103586. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2024.103586>
- James, W. (1884). What is an emotion? *Mind*, 9(34), 188-205. <https://doi.org/10.1093/mind/os-IX.34.188>
- James, W. (1994). The physical basis of emotion (Original work published in 1894). *Psychological Review*, 101(2), 205–210. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.101.2.205>
- Jeon, M., Walker, B. N., & Yim, J.-B. (2014). Effects of specific emotions on subjective judgment, driving performance, and perceived workload. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 24, 197-209. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.04.003>

- LeBlanc, V. R., & Posner, G. D. (2022). Emotions in simulation-based education : Friends or foes of learning? *Advances in Simulation*, 7(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s41077-021-00198-6>
- Liu, J., Wang, X., & Zhu, L. (2025). The impact of two computer-aided emotion regulation strategies on risky driving behaviors in a virtual environment. *BMC Psychology*, 13(1), 865. <https://doi.org/10.1186/s40359-025-03211-z>
- Maranges, H. M., Schmeichel, B. J., & Baumeister, R. F. (2017). Comparing cognitive load and self-regulatory depletion : Effects on emotions and cognitions. *Learning and Instruction*, 51, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.10.010>
- McCarty, D., & Kim, H. W. (2024). Risky behaviors and road safety : An exploration of age and gender influences on road accident rates. *PLOS ONE*, 19(1), e0296663. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296663>
- McManus, B., Cox, M. K., Vance, D. E., & Stavrinos, D. (2015). Predicting Motor Vehicle Collisions in a Driving Simulator in Young Adults Using the Useful Field of View Assessment. *Traffic Injury Prevention*, 16(8), 818-823. <https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1027339>
- Messerotti Benvenuti, S., Sarlo, M., Buodo, G., Mento, G., & Palomba, D. (2015). Influence of impulsiveness on emotional modulation of response inhibition : An ERP study. *Clinical Neurophysiology*, 126(10), 1915-1925. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.12.012>
- Michon, J.A. (1985). A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do?. In L. Evans & R.C. Schwing (Eds.), *Human Behavior and Traffic Safety* (pp. 485-524). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2173-6_19
- Mitchell, D. G. V., Nakic, M., Fridberg, D., Kamel, N., Pine, D. S., & Blair, R. J. R. (2007). The impact of processing load on emotion. *NeuroImage*, 34(3), 1299-1309. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.10.012>
- Nardelli, C., Montreuil, T., Naoufal, M., Berking, M., Baeyens, C., & Bortolon, C. (2024). French validation of the Emotion Regulation Skills Questionnaire. *European Review of Applied Psychology*, 74(1), 100877. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2023.100877>
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric Theory* (2nd ed.). McGraw-Hill
- Ochsner, K., & Gross, J. (2005). The cognitive control of emotion. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(5), 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.03.010>
- Paas, F., & Sweller, J. (2012). An Evolutionary Upgrade of Cognitive Load Theory : Using the Human Motor System and Collaboration to Support the Learning of Complex

- Cognitive Tasks. *Educational Psychology Review*, 24(1), 27-45.
<https://doi.org/10.1007/s10648-011-9179-2>
- 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>
- Provitolo, D., Tricot, A., Schleyer-Lindenmann, A., Boudoukha, A.-H., Verdière, N., Haule, S., Dubos-Paillard, E., Lanza, V., Charrier, R., Bertelle, C., Navarro, O., Lago-Marques, M., Ranarimahefa, P., Berred, A., Aziz-Alaoui, M., Mallet, P., Perez, S., & Tric, E. (2022). Saisir les comportements humains en situation de catastrophes : Proposition d'une démarche méthodologique immersive. *Cybergeos*.
<https://doi.org/10.4000/cybergeos.39495>
- Rego, C., & Montague, E. (2023). The Impact of Feedback Modalities and the Influence of Cognitive Load on Interpersonal Communication in Nonclinical Settings : Experimental Study Design. *JMIR Human Factors*, 10, e49675.
<https://doi.org/10.2196/49675>
- Reimer, B., & Mehler, B. (2011). The impact of cognitive workload on physiological arousal in young adult drivers : A field study and simulation validation. *Ergonomics*, 54(10), 932-942. <https://doi.org/10.1080/00140139.2011.604431>
- Rincón-Pérez, I., Sánchez-Carmona, A. J., Levy, D., López-Martín, S., Hinojosa, J. A., & Albert, J. (2025). The influence of emotional stimuli on response inhibition : A systematic review in non-clinical adults. *Frontiers in Psychology*, 16, 1577486.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1577486>
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6), 1161-1178. <https://doi.org/10.1037/h0077714>
- Scheibe, S., & Moghimi, D. (2021). Age and Context Effects in Daily Emotion Regulation and Well-Being at Work. *Work, Aging and Retirement*, 7(1), 31-45.
<https://doi.org/10.1093/workar/waz014>
- Schmitt, N. (1996). Uses and abuses of coefficient alpha. *Psychological Assessment*, 8(4), 350–353. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.8.4.350>

- Shetty, Y., Mehta, S., Tran, D., Soni, B., & McDaniel, T. (2021). Emotional Response to Vibrothermal Stimuli. *Applied Sciences*, 11(19), 8905. <https://doi.org/10.3390/app11198905>
- Shin, J.-G., & Kim, S.-H. (2021). Intelligibility of Haptic Signals in Vehicle Information Systems. *Sensors*, 21(13), 4583. <https://doi.org/10.3390/s21134583>
- Srinivasan, M. A., & Basdogan, C. (1997). Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges. *Computers & Graphics*, 21(4), 393–404. [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(97\)00030-7](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(97)00030-7)
- Stein, M.-K., Newell, S., Wagner, E. L., & Galliers, R. D. (2015). Coping with Information Technology : Mixed Emotions, Vacillation, and Nonconforming Use Patterns1. *MIS Quarterly*, 39(2), 367-392. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2015/39.2.05>
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving : Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Van Dillen, L. F., Heslenfeld, D. J., & Koole, S. L. (2009). Tuning down the emotional brain : An fMRI study of the effects of cognitive load on the processing of affective images. *NeuroImage*, 45(4), 1212-1219. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.01.016>
- Yao, Y., & Xu, D. (2024). Unconscious cognitive reappraisal and unconscious expression suppression regulate emotional responses : An ERP study. *Current Psychology*, 43(9), 7772-7784. <https://doi.org/10.1007/s12144-023-04943-0>
- 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>
- Zhang, L., Fan, H., Wang, S., & Li, H. (2019). The Effect of Emotional Arousal on Inhibition of Return Among Youth With Depressive Tendency. *Frontiers in Psychology*, 10, 1487. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01487>

Annexes

Annexe A. Items de Nasa-TLX et Affective Slider

NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988)

- 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 ?
- 4- Dans quelle mesure avez-vous réussi à accomplir ce qu'on vous a demandé ?
- 5- A quel point avez-vous dû fournir des efforts pour atteindre votre niveau de performance ?
- 6- A quel point vous êtes-vous senti(e) incertain(e), découragé(e), irrité(e), stressé(e) et agacé(e) ?

Affective Slider (Betella & Verschure, 2016)

Curseur : Percentage slider (0 = Faible valence/activation ; 100 = Forte valence/activation)

- Valence perçue :

Déplacez le curseur pour noter votre niveau de valence durant la tâche sur le simulateur.

La valence correspond au caractère positif ou négatif des émotions que vous avez ressenti en utilisant le système.

- Activation perçue :

Déplacez le curseur pour noter votre niveau d'activation durant la tâche sur le simulateur.

L'activation correspond à l'intensité des émotions que vous avez ressenti en utilisant le système.

Annexe B. Photographies des tâches

Tâche 1. Conduite régulière (*en ville, instructions auditives et intégrées dans l'écran*)



Tâche 2. Conduite multitâche (*en ville, instructions auditives*)



Tâche 3. Conduite en slaloms (*sur pont, limite de temps intégrée dans l'écran*)



Annexe C. Validité des résultats

Tableau C1. Validité des résultats de synthèse

Hypothèse	De	A	Tâche	B	SE B	F	p	Statut
H1a	Haptique	Valence	Aucune	X	X	X	X	Non-soutenue
H1b	Haptique	Activation	T2	12.31	5.61	4.83	.03	Partiel
H2a	Haptique X Inhibition	Valence	T2	-112.55	68.31	2.71	.11	Marginal et partiel
H2b	Haptique X Inhibition	Activation	T2 T3	-102.91 103.39	42.10 48.80	5.97 4.49	.02 .04	Partiel
H3a	Haptique X Charge cognitive	Valence	Aucune	X	X	X	X	Non-soutenue
H3b	Haptique X Charge cognitive	Activation	T1	-0.93	0.36	6.68	.01	Partiel
H4a	Valence	Performance	T1	-	-	-	-	Partiel et marginal
H4b	Activation	Performance	Aucune	X	X	X	X	Non-soutenue
H5a	Valence X Régulation	Performance		-	-	-	-	Partiel et marginal
H5b	Activation X Régulation	Performance	Aucune	X	X	X	X	Non-soutenue

Note. « X » signifie qu'aucun effet n'est significatif. « - » renvoie à se référer aux tables de validité par tâche pour les hypothèses de performance.

Tableau C2. Validité des résultats en TI

Hypothèse	De	A	B	SE B	F	p	Statut
H1a	Haptique	Valence	0.35	10.67	0.00	.97	Non-soutenue
H1b	Haptique	Activation	2.01	7.84	0.07	.79	Non-soutenue
H2a	Haptique X	Valence	75.65	90.57	0.70	.41	Non-soutenue
	Inhibition						
H2b	Haptique X	Activation	93.86	65.67	2.04	.16	Non-soutenue
	Inhibition						
H3a	Haptique X	Valence	0.06	0.42	0.02	.87	Non-soutenue
	Charge cognitive						
H3b	Haptique X	Activation	-0.93	0.36	6.68	.01	Soutenue
	Charge cognitive						
H4a	Valence	Performance					Partiel et
		<i>Perçue</i>	<i>0.04</i>	<i>0.008</i>	<i>30.50</i>	<i><.0001</i>	marginal
		<i>Frein</i>	<i>-0.0007</i>	<i>0.0003</i>	<i>3.37</i>	<i>.08</i>	
H4b	Activation	Performance	X	X	X	X	Non-soutenue
H5a	Valence X	Performance					Partiel
	Régulation	<i>Réévaluation X</i>	<i>0.0001</i>	<i>0.00</i>	<i>8.58</i>	<i>.008</i>	
		<i>Angle du volant</i>					
H5b	Activation X	Performance	X	X	X	X	Non-soutenue
	Régulation						

Note. X signifie qu'aucun effet n'est significatif.

Tableau C3. Validité des résultats en T2

Hypothèse	De	A	B	SE B	F	p	Statut
H1a	Haptique	Valence	-6.50	8.42	0.62	.43	Non-soutenue
H1b	Haptique	Activation	12.31	5.61	4.83	.03	Soutenue
H2a	Haptique X	Valence	-112.55	68.31	2.71	.11	Marginal
	Inhibition						
H2b	Haptique X	Activation	-102.91	42.10	5.97	.02	Soutenue
	Inhibition						
H3a	Haptique X	Valence	0.22	0.56	0.17	0.68	Non-soutenue
	Charge cognitive						
H3b	Haptique X	Activation	0.64	0.42	2.28	.14	Non-soutenue
	Charge cognitive						
H4a	Valence	Performance					Partiel
		<i>Perçue</i>	.02	0.01	5.04	0.03	
H4b	Activation	Performance	X	X	X	X	Non-soutenue
H5a	Valence X	Performance					Partiel et
	Régulation	<i>Réévaluation X</i>	-0.04	0.02	3.56	.07	marginal
		<i>Vitesse</i>					
		<i>Réévaluation X</i>	-.001	0.0006	3.54	.07	
		<i>DTCV</i>					
H5b	Activation X	Performance	X	X	X	X	Non-soutenue
	Régulation						

Note. X signifie qu'aucun effet n'est significatif.

Tableau C4. Validité des résultats en T3

Hypothèse	De	A	B	SE B	F	p	Statut
H1a	Haptique	Valence	4.54	9.29	0.24	.62	Non-soutenue
H1b	Haptique	Activation	-10.23	6.64	2.37	.13	Non-soutenue
H2a	Haptique X	Valence	43.25	75.06	0.33	.57	Non-soutenue
	Inhibition						
H2b	Haptique X	Activation	103.39	48.80	4.49	.04	Non-soutenue
	Inhibition						
H3a	Haptique X	Valence	0.10	0.62	0.03	.87	Non-soutenue
	Charge cognitive						
H3b	Haptique X	Activation	0.43	0.38	1.34	.26	Non-soutenue
	Charge cognitive						
H4a	Valence	Performance					Partiel
		<i>Perçue</i>	<i>0.03</i>	<i>.008</i>	<i>24.04</i>	<i><.0001</i>	
		<i>Vitesse</i>	<i>0.02</i>	<i>.009</i>	<i>5.89</i>	<i>.02</i>	
		<i>Angle du volant</i>	<i>.0006</i>	<i>.0002</i>	<i>5.68</i>	<i>.02</i>	
H4b	Activation	Performance					Non-soutenue
H5a	Valence X	Performance	X	X	X	X	Non-soutenue
	Régulation						
H5b	Activation X	Performance	X	X	X	X	Non-soutenue
	Régulation						

Note. X signifie qu'aucun effet n'est significatif.

Chapitre 3 – Conclusion

1. Rappel de la question de recherche et synthèse des résultats principaux

Ce mémoire avait pour objectif de comprendre comment les mécanismes émotionnels et cognitifs influencent l'effet du retour haptique sur la performance. Plus spécifiquement, cette étude visait à répondre à la question de recherche suivante : *dans quelle mesure la régulation émotionnelle, l'inhibition émotionnelle et la charge cognitive modèrent-elles l'effet du retour haptique sur la performance en simulation de conduite ?*

Nos analyses suggèrent que ces mécanismes émotionnels et cognitifs peuvent effectivement influencer l'effet du retour haptique. Plus précisément, l'inhibition et la charge cognitive semblent modérer considérablement l'impact du retour haptique sur l'intensité émotionnelle, mais différemment selon les contextes de conduite, allant parfois jusqu'à s'inverser. De la même façon, les résultats indiquent que la régulation module le lien entre l'intensité émotionnelle et la performance : bien que la stratégie de suppression ne révèle pas d'effet particulier, la stratégie de réévaluation présente un rôle modérateur important, pouvant être favorable ou défavorable selon la tâche. De ce fait, cette étude suggère que les mécanismes émotionnels jouent un rôle central dans l'effet du retour haptique sur la performance, mais de manière hétérogène entre les contextes de conduite, notamment entre la conduite multitâche et la conduite en slaloms.

2. Contribution scientifique et pratique

D'un point de vue scientifique, notre étude apporte plusieurs contributions aux théories mobilisées. Tout d'abord, nos résultats corroborent la théorie de James-Lange (1884/1994) qui soutient que les émotions proviennent de la perception des changements physiologiques de l'individu. En effet, cette étude met en évidence que le retour haptique peut influencer l'intensité émotionnelle des conducteurs, tout en précisant que cet effet peut fortement dépendre de la capacité d'inhibition émotionnelle. Ils nuancent ensuite la théorie de la charge cognitive (Sweller, 1988), qui explique que la quantité limitée de ressources mentales peut influencer la perception du retour haptique, en précisant que cet effet peut varier selon les tâches. Ce constat s'aligne notamment avec certains travaux récents qui apportent déjà cette nuance (Paas & Sweller, 2012). Enfin, les résultats élargissent la théorie de la régulation émotionnelle (Gross, 2015; Gross & John, 2003), en suggérant que la réévaluation émotionnelle modère effectivement l'effet de l'intensité émotionnelle sur la performance, mais

que cet effet pourrait tout aussi bien être positif que contreproductif selon les contextes (Gross, 2015). Nos observations s'inscrivent ainsi dans la continuité des études récentes, qui mettent en évidence la variété d'effets associés à nos variables. Plus largement, les résultats nuancés selon les différents profils et contextes concordent avec certains travaux suggérant que l'impact du retour haptique peut être plus ou moins bénéfique à la performance selon la tâche et l'individu (Benloucif et al., 2019; Huo et al., 2024; Rego & Montague, 2023). Cette étude contribue ainsi à développer une compréhension commune et nuancée de ces différentes théories, en observant comment les mécanismes physiologiques, cognitifs et émotionnels interagissent en contexte de simulation de conduite.

D'un point de vue pratique, nos observations soulignent la nécessité de développer des programmes de formation personnalisés, à travers une considération des différences de régulation émotionnelle et une sélection appropriée des tâches. Pour les responsables de formation, cela faciliterait l'observation des points forts et d'amélioration des conducteurs, et les aiderait à trouver la manipulation adéquate du retour haptique selon les profils. Cette approche favoriserait ainsi une utilisation du retour haptique centrée sur les besoins des utilisateurs, mais aussi un atout plus efficace pour l'intégration des comportements sécuritaire, aussi bien pour ceux de secteurs professionnels que pour ceux en auto-écoles. Par exemple, dans un contexte de service d'urgence, une bonne gestion des émotions est capitale. Les conducteurs professionnels nécessitent donc une formation adéquate, permettant de les préparer au terrain. Nos observations suggèrent que le retour haptique peut surcharger ceux qui ont une capacité d'inhibition émotionnelle plus faible dans certains contextes de conduite. Il serait donc pertinent de commencer l'apprentissage sans retour haptique, pour ensuite l'intégrer progressivement selon la performance et le type de tâche, afin de rendre la formation plus efficace.

3. Limites et perspectives

Bien que cette étude ait permis de soulever plusieurs constats pertinents, certains axes d'amélioration pourraient être utiles pour de prochaines recherches. Tout d'abord, le nombre limité de participants (N=25) nous a conduits à exclure certaines variables de contrôle, comme la familiarité avec les simulateurs de conduite ou encore la sensation de nausée. Pour de futures études, un échantillon plus conséquent permettrait d'inclure des effets explicatifs supplémentaires et une vision plus complète du modèle de recherche.

Ensuite, l'utilisation d'une échelle réduite de l'ERQ a pu contribuer à réduire son niveau de fiabilité interne. Ce choix méthodologique visait à alléger la durée de l'expérience pour limiter l'état de fatigue des participants, mais l'utilisation de la version complète de dix items permettrait d'obtenir des résultats plus consistants. Pour de prochaines recherches, il serait pertinent de trouver un équilibre entre la durée des questionnaires et la durée totale de l'expérience, sans compromettre la fiabilité des échelles. Par la même occasion, l'ajout de mesures comportementales ou physiologiques pourrait permettre d'approfondir la compréhension des mécanismes de régulation émotionnelle.

Par ailleurs, la même calibration a été utilisée pour tous les participants. Les résultats suggèrent que la présence du retour haptique ne représente pas une valeur ajoutée pour tous les individus, constituant une aide ou une distraction selon le profil. Cependant, il est possible d'imaginer que ces effets pourraient varier selon le niveau d'intensité du retour haptique. Pour de futures recherches, il serait donc pertinent de tester différentes calibrations, afin de déterminer si les effets du retour haptique sur la performance dépendent aussi de son intensité.

Enfin, cette expérience s'est limitée à trois tâches de conduite spécifiques. Il serait intéressant d'élargir les contextes expérimentaux pour comprendre plus largement les effets abordés dans notre étude. Les tâches de réflexes sont, par exemple, très considérées dans les secteurs professionnels, où une conduite rapide et efficace est essentielle. De cette façon, il serait possible de trouver des effets récurrents entre les tâches et les profils individuels. On pourrait ainsi déterminer si les mêmes mécanismes émotionnels et cognitifs s'appliquent à de nouveaux contextes de conduite, comme ceux où la vitesse et le temps constituent des éléments essentiels.

4. Conclusion finale

En guise de conclusion, cette étude a permis de mettre en lumière l'importance des différences individuelles et émotionnelles dans l'adaptation au retour haptique en simulation de conduite. En soulignant le rôle de la régulation émotionnelle, de l'inhibition inconsciente et de la charge cognitive, ce mémoire contribue à comprendre plus finement les performances et les expériences des conducteurs. Dans un contexte où la sécurité routière devient un enjeu mondial majeur, ces constats suggèrent des pistes d'amélioration concrètes pour développer des programmes de formation plus personnalisés, notamment en intégrant les dimensions émotionnelles. Cette dynamique pourrait favoriser une approche plus efficace de la sécurité routière, en contribuant à réduire les accidents et autres dangers de la route provoqués par l'erreur humaine.

Au-delà du domaine de la conduite automobile, cette recherche soulève aussi plusieurs pistes de réflexion quant à la place des réactions émotionnelles dans l'interaction humain-technologie. Nos résultats amènent à repenser la manière dont le retour haptique influence l'expérience utilisateur, en soulignant la nécessité d'adapter la manipulation du signal aux contextes d'étude et aux profils individuels. Plus spécifiquement, cette étude invite à réfléchir à une conception des programmes de formation centrée sur l'utilisateur. Cela pourrait influencer différents secteurs qui utilisent le retour haptique dans les formations, et dans lesquels les émotions jouent un rôle déterminant sur la performance des individus, tels que l'aviation ou le médical.

Bibliographie

- Albert, J., López-Martín, S., & Carretié, L. (2010). Emotional context modulates response inhibition : Neural and behavioral data. *NeuroImage*, 49(1), 914-921.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.08.045>
- Alonso, F., Faus, M., Riera, J. V., Fernandez-Marin, M., & Useche, S. A. (2023). Effectiveness of Driving Simulators for Drivers' Training : A Systematic Review. *Applied Sciences*, 13(9), 5266. <https://doi.org/10.3390/app13095266>
- Alotaibi, Y., Williamson, J. H., & Brewster, S. A. (2022). First Steps Towards Designing Electrotactons : Investigating Intensity and Pulse Frequency as Parameters for Electrotactile Cues. *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-11.
<https://doi.org/10.1145/3491102.3501863>
- Association canadienne des professionnels de la sécurité routière. (2025). *Vision Zéro, l'approche systémique de la sécurité routière et la décennie d'action des Nations Unies*. <https://carsp.ca/fr/news-and-resources/road-safety-information/vision-zero-and-the-safe-system-approach/>
- Battaglia, S., Serio, G., Scarpazza, C., D'Ausilio, A., & Borgomaneri, S. (2021). Frozen in (e)motion : How reactive motor inhibition is influenced by the emotional content of stimuli in healthy and psychiatric populations. *Behaviour Research and Therapy*, 146, 103963. <https://doi.org/10.1016/j.brat.2021.103963>
- Beaudry, A., & Pinsonneault, A. (2005). Understanding User Responses to Information Technology : A Coping Model of User Adaptation. *MIS Quarterly*, 29(3), 493.
<https://doi.org/10.2307/25148693>
- Ben-Haim, M. S., Williams, P., Howard, Z., Mama, Y., Eidels, A., & Algom, D. (2016). The Emotional Stroop Task : Assessing Cognitive Performance under Exposure to Emotional Content. *Journal of Visualized Experiments*, 112, 53720.
<https://doi.org/10.3791/53720>
- Benloucif, M. A., Sentouh, C., Floris, J., Simon, P., & Popieul, J.-C. (2019). Online adaptation of the Level of Haptic Authority in a lane keeping system considering the driver's state. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 61, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.08.013>

- Béquet, A. J. (2023). *Etude du stress et de sa régulation en contexte de conduite autonome à l'aune des différences individuelles*. [Thèse de doctorat, Université Lyon II]. HAL. <https://theses.hal.science/tel-04146982v1/document>
- Betella, A., & Verschure, P. F. M. J. (2016). The Affective Slider : A Digital Self-Assessment Scale for the Measurement of Human Emotions. *PLOS ONE*, 11(2), e0148037. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148037>
- Blanke, E. S., Bellintier, J. A., Riediger, M., & Brose, A. (2022). When and How to Regulate : Everyday Emotion-Regulation Strategy Use and Stressor Intensity. *Affective Science*, 3(1), 81-92. <https://doi.org/10.1007/s42761-021-00087-1>
- Bosurgi, G., Pellegrino, O., Sollazzo, G., & Ruggeri, A. (2025). Performance indexes for characterizing driving behavior. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, S2095756425001576. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.10.004>
- Bowers, A. R., Mandel, A. J., Goldstein, R. B., & Peli, E. (2010). Driving with Hemianopia, II : Lane Position and Steering in a Driving Simulator. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 51(12), 6605. <https://doi.org/10.1167/iovs.10-5310>
- Braun, M., Weber, F., & Alt, F. (2022). Affective Automotive User Interfaces—Reviewing the State of Driver Affect Research and Emotion Regulation in the Car. *ACM Computing Surveys*, 54(7), 1-26. <https://doi.org/10.1145/3460938>
- Campos, J. L., Bédard, M., Classen, S., Delparte, J. J., Hebert, D. A., Hyde, N., Law, G., Naglie, G., & Yung, S. (2017). Guiding Framework for Driver Assessment Using Driving Simulators. *Frontiers in Psychology*, 8, 1428. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01428>
- Cheng, X., Geng, X., Huang, Y., & Burdet, E. (2025). Haptic Feedback of Front Vehicle Motion May Improve Driving Control. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 10(1), 343-349. <https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3502063>
- Crandall, R., & Karadoğan, E. (2021). Designing Pedagogically Effective Haptic Systems for Learning : A Review. *Applied Sciences*, 11(14), 6245. <https://doi.org/10.3390/app11146245>
- De Bonis, M. (1968). La loi de Yerkes-Dobson : Problèmes méthodologiques liés à sa vérification. *L'année psychologique*, 68(1), 121-141. <https://doi.org/10.3406/psy.1968.27601>
- Du, N., Zhou, F., Pulver, E. M., Tilbury, D. M., Robert, L. P., Pradhan, A. K., & Yang, X. J. (2020). Examining the effects of emotional valence and arousal on takeover

- performance in conditionally automated driving. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 112, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.006>
- Engström, J., Markkula, G., Victor, T., & Merat, N. (2017). Effects of Cognitive Load on Driving Performance : The Cognitive Control Hypothesis. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 59(5), 734-764. <https://doi.org/10.1177/0018720817690639>
- European Transport Safety Council. (2025). *Ranking EU progress on road safety: 19th Road Safety Performance Index Report*. (PIN Report No. 19). ETSC. <https://etsc.eu/wp-content/uploads/ETSC-2025-Annual-PIN-Report-DIGITAL-V2.pdf>
- Eysenck, M. W., Derakshan, N., Santos, R., & Calvo, M. G. (2007). Anxiety and cognitive performance : Attentional control theory. *Emotion*, 7(2), 336-353. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.7.2.336>
- Feenstra, P., Van Der Horst, R., Grácio, B. J. C., & Wentink, M. (2010). Effect of Simulator Motion Cuing on Steering Control Performance : Driving Simulator Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2185(1), 48-54. <https://doi.org/10.3141/2185-07>
- Green, P. (2007, juillet 11). Why Driving Performance Measures Are Sometimes Not Accurate (and Methods to Check Accuracy). *Driving Assessment Conference 2007*. Driving Assessment Conference 2007. <https://doi.org/10.17077/drivingassessment.1267>
- Gross, J. J. (1998). Antecedent- and response-focused emotion regulation: Divergent consequences for experience, expression, and physiology. *Journal of Personality and Social Psychology*, 74(1), 224-237. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.74.1.224>
- Gross, J. J. (2015). Emotion Regulation : Current Status and Future Prospects. *Psychological Inquiry*, 26(1), 1-26. <https://doi.org/10.1080/1047840X.2014.940781>
- Gross, J. J., & John, O. P. (2003). Individual differences in two emotion regulation processes : Implications for affect, relationships, and well-being. *Journal of Personality and Social Psychology*, 85(2), 348-362. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.85.2.348>
- Gupta, R., Hur, Y.-J., & Lavie, N. (2016). Distracted by pleasure : Effects of positive versus negative valence on emotional capture under load. *Emotion*, 16(3), 328-337. <https://doi.org/10.1037/emo0000112>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.),

- Human mental workload* (pp. 139–183). North-Holland.
[https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Holman, A. C., & Popușoi, S. A. (2020). How You Deal with Your Emotions Is How You Drive. Emotion Regulation Strategies, Traffic Offenses, and the Mediating Role of Driving Styles. *Sustainability*, 12(12), 4929. <https://doi.org/10.3390/su12124929>
- Hoyt, R. E. (2019). The Impact of Motor Vehicle Simulator Training on Law Enforcement Officer Driving Behavior : Empirical Evidence from Accident Frequency and Severity. *Journal of Insurance Regulation*. <https://doi.org/10.52227/26011.2019>
- Huo, F., Wang, T., Fang, F., & Sun, C. (2024). The influence of tactile feedback in In-vehicle central control interfaces on driver emotions : A comparative study of touchscreens and physical buttons. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 101, 103586. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2024.103586>
- James, W. (1884). What is an emotion? *Mind*, 9(34), 188-205.
<https://doi.org/10.1093/mind/os-IX.34.188>
- James, W. (1994). The physical basis of emotion (Original work published in 1894). *Psychological Review*, 101(2), 205–210. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.101.2.205>
- Jeon, M., Walker, B. N., & Yim, J.-B. (2014). Effects of specific emotions on subjective judgment, driving performance, and perceived workload. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 24, 197-209.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.04.003>
- Jiang, Y., Yao, X., Zhu, Y., Gong, X., Yao, Z., Wong, Y., Guo, Y., & Mi, H. (2025). Miao-BOT : A Haptic Creature Design for Enhancing Emotional Regulation in Driving Scenarios. *Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-8. <https://doi.org/10.1145/3706599.3720107>
- LeBlanc, V. R., & Posner, G. D. (2022). Emotions in simulation-based education : Friends or foes of learning? *Advances in Simulation*, 7(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s41077-021-00198-6>
- Liu, J., Wang, X., & Zhu, L. (2025). The impact of two computer-aided emotion regulation strategies on risky driving behaviors in a virtual environment. *BMC Psychology*, 13(1), 865. <https://doi.org/10.1186/s40359-025-03211-z>
- Maranges, H. M., Schmeichel, B. J., & Baumeister, R. F. (2017). Comparing cognitive load and self-regulatory depletion : Effects on emotions and cognitions. *Learning and Instruction*, 51, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.10.010>

- McCarty, D., & Kim, H. W. (2024). Risky behaviors and road safety : An exploration of age and gender influences on road accident rates. *PLOS ONE*, 19(1), e0296663. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296663>
- McManus, B., Cox, M. K., Vance, D. E., & Stavrinos, D. (2015). Predicting Motor Vehicle Collisions in a Driving Simulator in Young Adults Using the Useful Field of View Assessment. *Traffic Injury Prevention*, 16(8), 818-823. <https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1027339>
- Messerotti Benvenuti, S., Sarlo, M., Buodo, G., Mento, G., & Palomba, D. (2015). Influence of impulsiveness on emotional modulation of response inhibition : An ERP study. *Clinical Neurophysiology*, 126(10), 1915-1925. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.12.012>
- Michon, J.A. (1985). A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do?. In L. Evans & R.C. Schwing (Eds.), *Human Behavior and Traffic Safety* (pp. 485-524). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2173-6_19
- Ministère des Transports et de la Mobilité durable. (2023). *Plan d'action sécurité routière 2023-2028*. Gouvernement du Québec. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/transports/ministere-des-transports/Plan-action-securite-routiere/Plan_action_securite_routiere_2023-2028.pdf
- Mitchell, D. G. V., Nakic, M., Fridberg, D., Kamel, N., Pine, D. S., & Blair, R. J. R. (2007). The impact of processing load on emotion. *NeuroImage*, 34(3), 1299-1309. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.10.012>
- Nardelli, C., Montreuil, T., Naoufal, M., Berking, M., Baeyens, C., & Bortolon, C. (2024). French validation of the Emotion Regulation Skills Questionnaire. *European Review of Applied Psychology*, 74(1), 100877. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2023.100877>
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric Theory* (2nd ed.). McGraw-Hill
- Ochsner, K., & Gross, J. (2005). The cognitive control of emotion. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(5), 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.03.010>
- Paas, F., & Sweller, J. (2012). An Evolutionary Upgrade of Cognitive Load Theory : Using the Human Motor System and Collaboration to Support the Learning of Complex Cognitive Tasks. *Educational Psychology Review*, 24(1), 27-45. <https://doi.org/10.1007/s10648-011-9179-2>
- 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>
- Prohn, M. J., & Herbig, B. (2022). Traffic safety knowledge gain of ambulance drivers after simulator-based training. *BMC Medical Education*, 22(1), 216. <https://doi.org/10.1186/s12909-022-03279-w>
- Provitolo, D., Tricot, A., Schleyer-Lindenmann, A., Boudoukha, A.-H., Verdière, N., Haule, S., Dubos-Paillard, E., Lanza, V., Charrier, R., Bertelle, C., Navarro, O., Lago-Marques, M., Ranarimahefa, P., Berred, A., Aziz-Alaoui, M., Mallet, P., Perez, S., & Tric, E. (2022). Saisir les comportements humains en situation de catastrophes : Proposition d'une démarche méthodologique immersive. *Cybergeos*. <https://doi.org/10.4000/cybergeos.39495>
- Rego, C., & Montague, E. (2023). The Impact of Feedback Modalities and the Influence of Cognitive Load on Interpersonal Communication in Nonclinical Settings : Experimental Study Design. *JMIR Human Factors*, 10, e49675. <https://doi.org/10.2196/49675>
- Reimer, B., & Mehler, B. (2011). The impact of cognitive workload on physiological arousal in young adult drivers : A field study and simulation validation. *Ergonomics*, 54(10), 932-942. <https://doi.org/10.1080/00140139.2011.604431>
- Rincón-Pérez, I., Sánchez-Carmona, A. J., Levy, D., López-Martín, S., Hinojosa, J. A., & Albert, J. (2025). The influence of emotional stimuli on response inhibition : A systematic review in non-clinical adults. *Frontiers in Psychology*, 16, 1577486. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1577486>
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6), 1161-1178. <https://doi.org/10.1037/h0077714>
- Scheibe, S., & Moghimi, D. (2021). Age and Context Effects in Daily Emotion Regulation and Well-Being at Work. *Work, Aging and Retirement*, 7(1), 31-45. <https://doi.org/10.1093/workar/waz014>
- Schmitt, N. (1996). Uses and abuses of coefficient alpha. *Psychological Assessment*, 8(4), 350-353. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.8.4.350>

- Shetty, Y., Mehta, S., Tran, D., Soni, B., & McDaniel, T. (2021). Emotional Response to Vibrothermal Stimuli. *Applied Sciences*, 11(19), 8905.
<https://doi.org/10.3390/app11198905>
- Shin, J.-G., & Kim, S.-H. (2021). Intelligibility of Haptic Signals in Vehicle Information Systems. *Sensors*, 21(13), 4583. <https://doi.org/10.3390/s21134583>
- Srinivasan, M. A., & Basdogan, C. (1997). Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges. *Computers & Graphics*, 21(4), 393–404.
[https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(97\)00030-7](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(97)00030-7)
- Stein, M.-K., Newell, S., Wagner, E. L., & Galliers, R. D. (2015). Coping with Information Technology : Mixed Emotions, Vacillation, and Nonconforming Use Patterns1. *MIS Quarterly*, 39(2), 367-392. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2015/39.2.05>
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving : Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- United Nations Department of Safety and Security. (2019). *Road safety strategy for the United Nations system and its personnel: A partnership for safer journeys*. United Nations. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/2020/09/road_safety_strategy_booklet.pdf
- Van Dillen, L. F., Heslenfeld, D. J., & Koole, S. L. (2009). Tuning down the emotional brain : An fMRI study of the effects of cognitive load on the processing of affective images. *NeuroImage*, 45(4), 1212-1219.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.01.016>
- World Health Organization. (2025). *Road safety takes centre stage at world's leading transport forum*. <https://www.who.int/news/item/28-05-2025-road-safety-takes-centre-stage-at-world-s-leading-transport-forum>
- World Health Organization. (2023). *Road traffic injuries*. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>
- Yao, Y., & Xu, D. (2024). Unconscious cognitive reappraisal and unconscious expression suppression regulate emotional responses : An ERP study. *Current Psychology*, 43(9), 7772-7784. <https://doi.org/10.1007/s12144-023-04943-0>
- 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>

Zhang, L., Fan, H., Wang, S., & Li, H. (2019). The Effect of Emotional Arousal on Inhibition of Return Among Youth With Depressive Tendency. *Frontiers in Psychology, 10*, 1487. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01487>

Déclaration d'utilisation de l'intelligence artificielle générative

Logiciels

Dans le cadre de la rédaction de ce mémoire, je déclare avoir utilisé simultanément deux outils d'intelligence artificielle générative entre le 1^{er} septembre 2025 et le 11 décembre 2025 :

- **ChatGPT** (Version 5.1, <https://chatgpt.com>)
- **NotebookLM** (Google, <https://notebooklm.google>)

Objectifs

- *Préparation et vérification de recherches documentaires*

Après avoir téléchargé les articles trouvés, je les ajoutais dans NotebookLM afin d'accéder au contenu original et faire une analyse plus approfondie. Cette démarche permettait aussi d'identifier d'autres travaux sur ces sujets dans les bibliographies et de vérifier l'alignement des mes paragraphes avec les sources.

Exemple de requête :

« Voici le paragraphe que j'ai rédigé en utilisant la source X.pdf et Y.pdf. Les construits sont-ils corrects et bien mobilisés ? »

Exemple de réponse :

« Le paragraphe est partiellement confirmé par les sources. La première partie est confirmée par X.pdf, qui soutient que XXX. La seconde partie est soutenue par Y.pdf qui soutient que YYY. Toutefois, l'affirmation concernant ZZZ n'est pas spécifiquement établie dans les sources. »

- *Appui à la rédaction*

Après avoir structuré mes idées et rédigé mes paragraphes, je les transmettais à ChatGPT afin d'éviter les répétitions et améliorer certaines tournures de phrase.

Exemple de requête :

« Voici mon paragraphe pour la synthèse générale des résultats : XXX. Peux-tu me donner des idées de mots de transition pour fluidifier les transitions sans changer mon contenu ? »

Exemple de réponse :

« Voici des tournures pertinentes pour fluidifier sans changer le texte et le ton: XXX ».

Archives

Conformément aux recommandations de mes codirecteurs, une archive des prompts ayant contribué à créer du contenu intégré dans le mémoire est disponible dans un fichier séparé. Ce dernier est enregistré dans le Sharepoint du Tech3Lab, plus précisément dans la section du projet associé à cette recherche.