



HAL
open science

Impact des choix de conception sur la validité d'un simulateur de conduite moto

Pauline Michel, Samir Bouaziz, Stéphane Espie

► **To cite this version:**

Pauline Michel, Samir Bouaziz, Stéphane Espie. Impact des choix de conception sur la validité d'un simulateur de conduite moto. 3ème colloque Connaissances scientifiques pour les motocycles (COS-MOS 2024), Oct 2024, Marne-la-Vallée, France. hal-04790706

HAL Id: hal-04790706

<https://hal.science/hal-04790706v1>

Submitted on 19 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Impact des choix de conception sur la validité d'un simulateur de conduite moto

Pauline Michel¹, Samir Bouaziz¹, Stéphane Espié²

¹Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, SATIE, 91190 Gif-sur-Yvette, France

²Université Gustave Eiffel, SATIE, 91190 Gif-sur-Yvette, France

Introduction

L'étude des comportements des conducteurs moto est un enjeu important : les conducteurs moto sont surreprésentés dans l'accidentalité routière, avec environ 25 fois plus de risque d'être tués que les conducteurs automobiles en France (ONISR, 2024).

Dans le domaine de la sécurité routière, un simulateur de conduite est un outil d'observation et de mesure du comportement des conducteurs, qui offre un meilleur contrôle des variables expérimentales et augmente les possibilités d'études en toute sécurité. Un simulateur permet dans tous les cas d'observer des phénomènes et de collecter des données, mais les observations et les mesures effectuées grâce à un simulateur « mal conçu » (ou « mal réalisé ») peuvent être biaisées et conduire à des conclusions biaisées elles aussi. Pour observer des comportements de conduite comparables à ceux constatés dans la réalité, il est nécessaire que le simulateur soit contrôlable par le conducteur de la manière la plus naturelle possible. Il est aussi indispensable que les situations routières proposées soient les plus « réalistes » possibles. Dans cet article, nous nous focaliserons sur la contrôlabilité du simulateur et son impact sur la « crédibilité » de la simulation de conduite proposée.

En science automatique, un système est défini comme contrôlable s'il existe une séquence finie d'échantillons de commande qui amène l'état du système de tout état initial à tout état final. La contrôlabilité d'un système est un critère de conception dans le domaine de la téléopération. Le conducteur d'un simulateur de conduite ne conduit pas un véhicule réel, mais téléopère un modèle de véhicule. En conduite réelle, le conducteur s'appuie sur un ensemble d'informations sensorielles et sur son expérience pour contrôler le véhicule. Les simulateurs actuels, intrinsèquement limités par leurs architectures, ne sont pas capables de reproduire l'ensemble des

informations sensorielles présentes dans la réalité. Il apparaît donc nécessaire d'ajuster le modèle de véhicule simulé à l'architecture matérielle et logicielle du simulateur, qui permet de contrôler le véhicule.

Au vu de ces considérations, nous préconisons une approche de conception d'un simulateur de conduite fondée sur l'adéquation entre la complexité architecturale du simulateur et la complexité du modèle de véhicule utilisé, afin d'assurer la contrôlabilité du simulateur par le conducteur. En garantissant cette contrôlabilité et en assurant une tâche de contrôle la plus proche possible de celle réalisée en conduite réelle, nous pensons pouvoir minimiser le biais induit par le « pilotage » du simulateur et la survenue du mal du simulateur. Des études relativement récentes rapportent en effet des taux d'abandon en raison de mal du simulateur allant jusqu'à 35% (Himmels et al., 2024; Liebherr et al., 2020).

1. Méthodologie

Nous disposons d'un simulateur de conduite moto à plate-forme dynamique (Figure 1), dont le développement a commencé en 2006 dans le cadre du projet de recherche ANR SIMACOM.



Figure 1. Notre simulateur de conduite moto

Avant les travaux que nous présentons, ce simulateur a été utilisé pour mener plusieurs expérimentations, par exemple dans le cadre du projet VIGI2RM qui avait pour objectif de comprendre l'impact de la fatigue sur la conduite moto (Bougard et al., 2021). Cependant, les situations de conduite que permettait de simuler notre simulateur restaient limitées. En utilisant l'approche de conception « centrée contrôlabilité » que nous défendons, nous avons repensé intégralement l'architecture matérielle et logicielle de ce simulateur (Michel et al., 2022), et développé en particulier un système de retour haptique au guidon. Notre objectif était de maximiser le domaine de validité du simulateur en termes de situations de conduite pouvant être simulées et donc étudiées.

A l'issue de ces travaux, nous avons conçu et mené une expérimentation dont l'objectif était double : valider la contrôlabilité du simulateur d'une part, et d'autre part étudier l'impact de la complexité architecturale du

simulateur par rapport à la complexité du modèle de moto sur le ressenti (subjectif) des conducteurs et sur leurs performances de contrôle de trajectoire.

1.1 Participants

Vingt-quatre participants (2 femmes et 22 hommes), âgés de 25 à 65 ans (d'âge moyen 48,5 ans, écart-type 12,5 ans) ont pris part à cette expérimentation. Les participants étaient tous titulaires du permis moto (catégorie A) depuis plus de 3 ans (âge moyen du permis 22,6 ans, écart-type 12,8 ans) et ont déclaré parcourir en moyenne 11319 km par an (avec un écart-type 8058,4 km/an).

L'expérimentation a été précédée par une phase de pré-expérimentation qui a permis de vérifier le bon déroulement du protocole expérimental, et notamment de paramétrer le simulateur. Les données relatives à trois participants (1 femme et 2 hommes), qui ont participé à cette phase de pré-expérimentation, ont de ce fait été exclues des analyses que nous présentons dans cet article.

1.2 Dispositif expérimental

L'expérimentation s'est déroulée sur notre simulateur de conduite moto. Pour toutes les modalités, le simulateur utilisait un retour haptique au guidon. Le mouvement d'inclinaison (roulis) de la plate-forme dynamique était activé ou désactivé suivant les modalités des variables à tester. La plage de débattement (limitée par la structure) du mouvement de roulis de notre simulateur est de $\pm 12,5^\circ$. Lobjois & Mars (2020) ont montré que la limitation de cet angle et l'ajout d'un angle de roulis visuel permettent de donner l'illusion au conducteur d'un mouvement d'inclinaison, tout en évitant les sensations de chute ou de déséquilibre critique liées à l'absence de rendu des forces centrifuges.

L'environnement routier virtuel utilisé était un périphérique 2 x 2 voies.

1.3 Tâche

La situation expérimentale consistait en plusieurs sessions de conduite sur le circuit routier, à trois vitesses différentes : basse (36 km/h), moyenne (72 km/h) et haute (108 km/h). La vitesse était régulée par le système pour qu'elle soit la même pour tous les participants, de sorte à pouvoir comparer les résultats.

Dix obstacles, des voitures à l'arrêt, étaient placés sur la route, à distance égale les unes des autres (cette distance dépendant de la vitesse de déplacement), pour encourager les participants à effectuer des manœuvres de changement de voie à des endroits précis. Une illustration de la scène visuelle correspondante est donnée en Figure 2.



Figure 2. Visuel de l'environnement routier dans lequel se déplaçaient les participants pendant l'expérimentation (vue tronquée)

1.4 Plan expérimental

Pour chaque vitesse de déplacement, les participants ont conduit le simulateur avec deux configurations de la plate-forme dynamique : avec ou sans rendu d'inclinaison, selon deux niveaux de complexité du modèle de moto implémenté. Le plan expérimental était donc composé de trois facteurs intra-participants : « rendu dynamique d'inclinaison » (sans, avec) et « modèle de moto » (simple, complexe), soit quatre réglages différents du simulateur, et « vitesse de déplacement » (basse, moyenne, haute).

Le modèle de moto « simple » correspondait à un modèle fonctionnel de moto que nous avons développé, qui manipule deux corps : un premier corps composé de la colonne de direction et de la roue avant, et un second corps composé du châssis et de la roue arrière, avec un effet d'un corps sur l'autre (dépendant de la vitesse). Le modèle de moto « complexe » correspondait au modèle de Carvallo-Whipple, qui est issu de la littérature (Meijaard et al., 2007). Ce modèle a fait l'objet de nombreux travaux de la communauté scientifique et des études de validité ont été menées (Schwab & Meijaard, 2013). Les deux modèles utilisés reproduisent l'effet de contrebraquage.

Les participants ont conduit le simulateur durant $2 \times 2 \times 3 = 12$ sessions de conduite. De sorte à pouvoir confronter les participants au maximum de variantes expérimentales, les modalités de vitesse ont toujours été présentées dans le même ordre, de la plus « facile » à la plus « difficile », du point de vue de l'équilibre d'une moto pour une tâche de type changement de voie : moyenne, haute, basse (Cossalter & Sadauckas, 2006). A l'intérieur de ces différentes modalités de vitesses, les différentes variantes expérimentales « rendu dynamique d'inclinaison » x « modèle de moto » ont été présentées dans un ordre contrebalancé entre les participants.

1.5 Variables dépendantes

Cette expérimentation avait pour objectif de comparer les comportements des conducteurs pour un simulateur de conduite avec modèle de véhicule et architecture de complexité « similaire » (de même ordre), et un simulateur de conduite avec modèle de véhicule et architecture de complexités « différentes » (d'ordres différents).

Pendant l'expérimentation, nous avons collecté des données objectives sur le comportement de conduite : couples appliqués au guidon et au corps de la moto, positions et vitesses du véhicule. D'autre part, nous avons recueilli des données subjectives par verbalisation pendant l'expérimentation, pour recueillir le ressenti général des participants en termes de facilité de la tâche de contrôle de trajectoire, de réalisme du simulateur par rapport à une moto, et d'éventuels symptômes d'inconfort. Les participants étaient encouragés à exprimer leur ressenti sur ces points au fil de l'eau (pendant les sessions de conduite) et lors de temps dédiés (de l'ordre de quelques minutes) entre les sessions de conduite. Les expérimentateurs notaient les qualificatifs utilisés.

1.6 Procédure expérimentale

Les participants ont été accueillis individuellement et ont tous signé un formulaire de consentement. Ils ont d'abord conduit le simulateur pendant une phase de familiarisation qui consistait à conduire librement sur un réseau routier pendant environ 15 minutes. Dans la phase d'expérimentation à proprement parler, les participants avaient pour consigne de conduire de la manière la plus naturelle possible. Le temps de conduite pour chaque participant était d'environ 1 heure et 30 minutes, décomposé en 12 sessions séparées par des pauses. Au total, l'expérimentation durait environ 3 heures.

2. Résultats et discussion

2.1 Mesures objectives

Pour notre analyse, nous avons sélectionné les trajectoires autour de la première moitié des véhicules arrêtés. Nous pensons ainsi limiter les effets de l'adaptation à la modalité testée.

La première métrique que nous avons choisie pour l'analyse des données acquises est le taux d'échec pour une variante expérimentale donnée. En première approche, un participant est en échec soit s'il abandonne avant d'arriver à la zone de test (de son propre chef ou parce qu'il n'y parvient pas au bout de 3 tentatives maximum), soit parce qu'il sort de la route, c'est-à-dire des 3 voies disponibles dans son sens de circulation (2 voies de circulation et la bande d'arrêt d'urgence). Les taux d'échec et de réussite selon ces critères sont repris par la Figure 3.

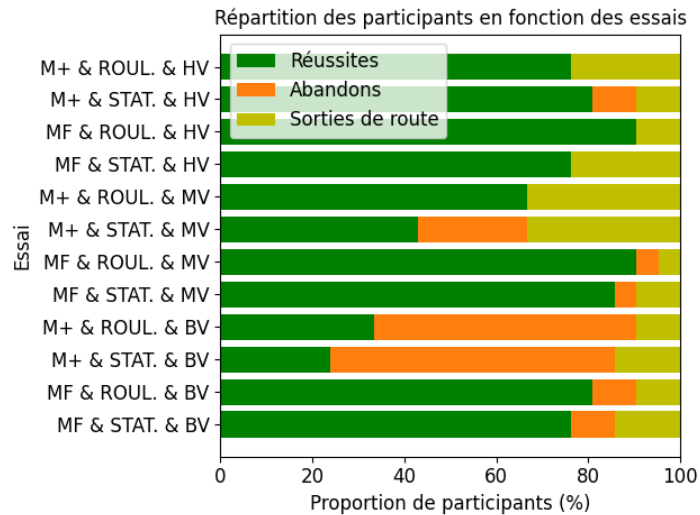


Figure 3. Taux d'échec et de réussite selon la session de conduite. MF : modèle fonctionnel, M+ : modèle complexe, STAT. : sans rendu d'inclinaison, ROUL. : avec rendu d'inclinaison, BV/MV/HV : basse/moyenne/haute vitesse

En analysant les taux d'échec et de réussite, on peut observer que, quelle que soit la vitesse de déplacement, les participants ont en moyenne éprouvé plus de difficultés à contrôler leur trajectoire au cours des sessions de conduite sans rendu d'inclinaison. De plus, les participants ont plus été en situation d'échec de contrôle de trajectoire pour les variantes expérimentales où le modèle implémenté par le simulateur était le modèle complexe, en particulier en basse vitesse, c'est-à-dire dans le cas où la moto simulée est en déséquilibre et donc plus difficile à contrôler.

Les trajectoires effectuées par les participants (représentées pour la vitesse moyenne sur la Figure 4, en ne sélectionnant que les trajectoires sans sortie de route) étaient, pour une même vitesse de déplacement, plus variables dans les cas où le modèle implémenté était le modèle complexe par rapport au modèle fonctionnel, et dans les cas où la plate-forme ne restituait pas l'inclinaison de la moto simulée par rapport à ceux où ce mouvement était restitué.

Ces observations ont tendance à montrer que le rendu de mouvement de roulis a un impact positif pour les deux modèles testés. Par ailleurs, le modèle fonctionnel permet aux participants un meilleur contrôle de leur trajectoire, et est donc mieux adapté.

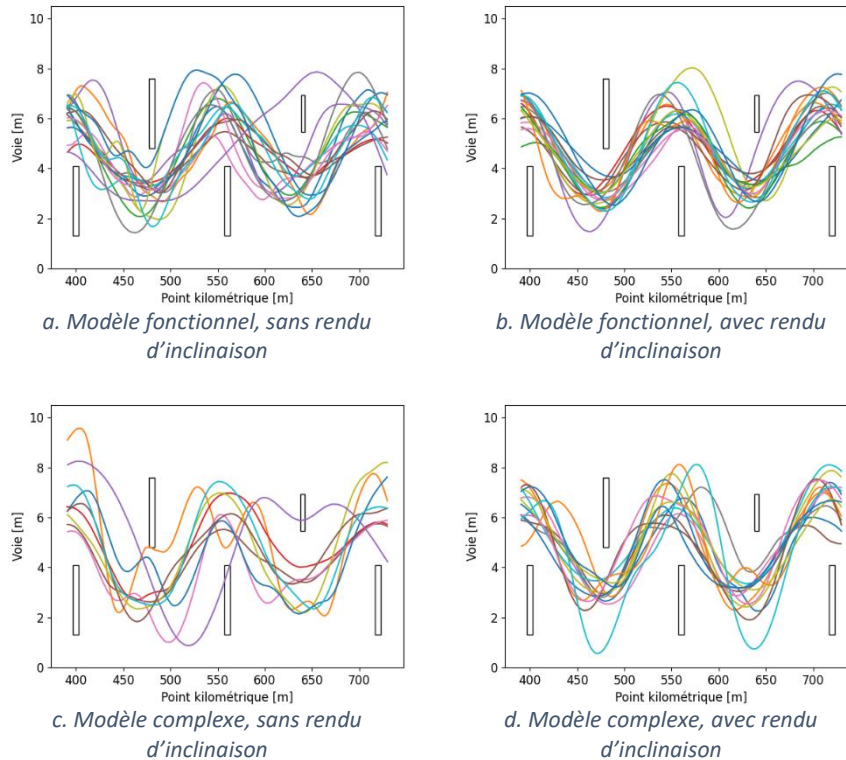


Figure 4. Trajectoires sans sortie de route des participants de l'expérimentation dans les cas avec une vitesse de déplacement moyenne : position latérale (voie en mètres) en fonction de la position longitudinale (point kilométrique en mètres)

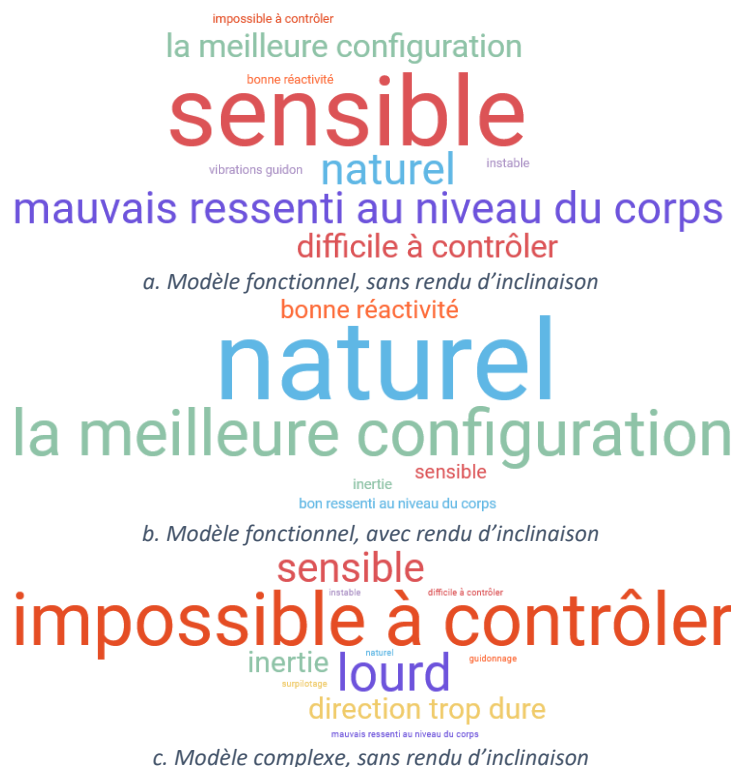
Cette conclusion s'appuie sur une première analyse des données. Des analyses plus approfondies doivent être réalisées en sélectionnant notamment plus finement les trajectoires « réussies », et en utilisant d'autres métriques. Pour ce faire, il faut prendre en compte que différentes formes de trajectoires peuvent être considérées comme réussies.

2.2 Verbalisations

Nous avons représenté les qualificatifs utilisés par les participants (maximum onze) pendant l'expérimentation sous la forme de nuages de mots (en utilisant le générateur de nuages de mots NuagesDeMots), de sorte à mettre en évidence d'une part des ressentis subjectifs partagés par plusieurs participants, et d'autre part des pistes d'améliorations potentielles pour les cas dans lesquels la moto virtuelle était jugée difficilement contrôlable, voire non contrôlable. Les nuages de mots obtenus pour les sessions de conduite à une vitesse de déplacement moyenne sont donnés sur la Figure 5.

L'analyse des retours des participants aboutit à plusieurs observations :

- sans rendu d'inclinaison par la plate-forme du simulateur, la moto virtuelle était en général jugée difficilement contrôlable par les participants, voire impossible à contrôler, et les commandes étaient jugées trop sensibles (alors que la sensibilité paramétrée était la même que dans les cas correspondants mais avec rendu d'inclinaison) ;
- certains participants ont estimé que le comportement de la moto virtuelle n'était pas naturel dans les cas sans rendu d'inclinaison, notamment en termes de ce qu'ils ressentaient au niveau du corps (par opposition au ressenti au niveau des mains et des bras), mais ce n'était pas le cas de tous ;
- avec rendu d'inclinaison de la plate-forme, le comportement du simulateur était jugé naturel par une part variable des participants suivant la vitesse de déplacement ;
- quelle que soit la vitesse, une majorité des participants classaient le cas « modèle fonctionnel » x « avec rendu d'inclinaison » comme le plus réaliste et contrôlable, et ce notamment du fait d'un comportement du guidon qui ne leur semblait pas naturel dans le cas « modèle complexe » x « avec rendu d'inclinaison ».



impossible à contrôler
lourd
naturel direction trop dure
inertie
la meilleure configuration
difficile à contrôler
guidonnage

d. Modèle complexe, avec rendu d'inclinaison

Figure 5. Nuages de mots reportant les retours faits par les participants pendant les verbalisations, pour les cas avec une vitesse de déplacement moyenne

Ces observations sont cohérentes avec l'analyse des mesures objectives présentées.

2.3 Manœuvre de demi-tour

La situation de conduite la plus facile à reproduire est celle à moyenne vitesse, et tous les simulateurs existants sont capables de le faire. Les équipes collaborant avec des constructeurs qui développent des motos de compétition privilégient les situations de conduite à très haute vitesse. Les situations à basse vitesse, comme la conduite en ville, ne sont en général pas considérées. Ces situations sont en fait les plus difficiles à simuler : un point clé de la tâche de conduite d'une moto étant la gestion de l'équilibre du véhicule, difficile en simulation, et la moto est particulièrement instable à basse vitesse.

Ainsi, à notre connaissance, aucun des simulateurs existants ne peut permettre d'étudier des situations urbaines de type démarrage au feu et tourne à droite (ou à gauche). Ces manœuvres demandent une dextérité particulière, déjà difficile à acquérir pour les débutants dans la réalité, et ces manœuvres sont d'autant plus difficiles à restituer sur simulateur de conduite. Ces situations seraient pourtant très utiles pour les études de comportement car les carrefours sont parmi les sites d'accidents les plus fréquents pour les motocyclistes (FEMA, 2023). La simulation de ce type de situation représente un verrou à lever pour la simulation de conduite moto, qui nécessite pour ce faire une très bonne contrôlabilité du simulateur.

Au cours de l'expérimentation que décrit cet article, nous avons proposé aux participants qui se sentaient « à l'aise » et qui l'acceptaient une session de conduite supplémentaire au cours de laquelle ils devaient effectuer un demi-tour à vitesse régulée à 15 km/h, c'est-à-dire une vitesse de déplacement très basse du point de vue de l'équilibre d'une moto. Ils devaient réaliser ce demi-tour dans la configuration où le simulateur implémentait le modèle de moto fonctionnel, et avec rendu dynamique

d'inclinaison, c'est-à-dire dans la configuration la plus contrôlable de notre simulateur, et ce sans pouvoir utiliser une accélération ou un freinage pour stabiliser leur trajectoire (en sortie de manœuvre notamment). 67% des participants ont été confrontés à cette situation de conduite supplémentaire et 71% d'entre eux ont réussi à effectuer une manœuvre de demi-tour, soit environ 47% de tous les conducteurs ayant pris part à notre expérimentation. Nous considérons ces résultats comme particulièrement encourageants car cette manœuvre nécessite un très bon contrôle de l'équilibre de la moto.

Conclusion

Les premières analyses des résultats (mesures subjectives comme objectives) de cette expérimentation tendent à valider notre hypothèse : à l'issue de nos travaux, notre simulateur de conduite moto est contrôlable par un panel de conducteurs de deux-roues motorisés, et ce pour des vitesses allant de basse (36 km/h), à haute (108 km/h). La meilleure contrôlabilité du simulateur est atteinte en utilisant un modèle de moto « simple », modèle dit fonctionnel que nous avons développé (par rapport à un modèle « complexe » issu de la littérature), et un rendu dynamique à deux degrés de liberté : roulis et angle de guidon.

Nous disposons de plusieurs motos instrumentées et, pour tester la validité de notre simulateur pour étudier des manœuvres, notamment en situation urbaine et à basse vitesse, nous prévoyons de mener des expérimentations comparatives en conduite réelle et simulée. Cependant, la conception d'un simulateur de conduite moto capable de reproduire à l'échelle 1 la physique des phénomènes (par exemple la dynamique latérale pour les virages à droite et à gauche) est impossible techniquement. La conception d'un tel simulateur s'attache donc à produire une illusion de conduite qualitativement « acceptable ». La validation du simulateur pour l'étude des comportements de conduite consiste donc, pour des situations de conduite variées, à vérifier que les comportements observés « en virtuel » sont équivalents à ceux observés « en réel », et que les ressentis de conduite « en virtuel » s'approchent au plus près de ceux « en réel ». C'est l'approche que nous avons adoptée dans le cadre des travaux présentés dans cet article.

Au vu des résultats encourageants de notre expérimentation, nous pensons que l'approche proposée, qui est de chercher une adéquation entre la complexité architecturale du simulateur et la complexité du modèle de véhicule téléopéré est pertinente et généralisable à d'autres simulateurs de conduite. L'optimisation de notre simulateur nous permet d'envisager son utilisation pour l'étude de situations de conduite plus complexes. Après développement d'un modèle de moto électrique, nous prévoyons par exemple des expérimentations visant à comparer les comportements de conduite d'utilisateurs de motos thermiques et électriques.

Références

- Bougard, C., Davenne, D., Moussay, S., & Espié, S. (2021). Evaluating sleep deprivation and time-of-day influences on crash avoidance maneuvers of young motorcyclists using a dynamic simulator. *Journal of Safety Research*, 78, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2021.05.006>
- Cossalter, V., & Sadauckas, J. (2006). Elaboration and quantitative assessment of manoeuvrability for motorcycle lane change. *Vehicle System Dynamics*, 44(12), 903-920. <https://doi.org/10.1080/00423110600742072>
- FEMA. (2023). Safer roads for motorcyclists: Moving towards a systematic approach for motorcycle safety.
- Himmels, C., Venrooij, J., Parduži, A., Peller, M., & Riener, A. (2024). The bigger the better? Investigating the effects of driving simulator fidelity on driving behavior and perception. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 101, 250-266. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2024.01.007>
- Liebherr, M., Schweig, S., Brandtner, A., Averbek, H., Maas, N., Schramm, D., & Brand, M. (2020). When virtuality becomes real: Relevance of mental abilities and age in simulator adaptation and dropouts. *Ergonomics*, 63(10), 1271-1280. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1778095>
- Lobjois, R., & Mars, F. (2020). Effects of motorcycle simulator configurations on steering control and gaze behavior in bends. *Journal of Experimental Psychology. Applied*, 26(1), 108-123. <https://doi.org/10.1037/xap0000241>
- Meijaard, J. P., Papadopoulos, J. M., Ruina, A., & Schwab, A. L. (2007). Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: A benchmark and review. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463(2084), 1955-1982. <https://doi.org/10.1098/rspa.2007.1857>
- Michel, P., Bouaziz, S., Delgeher, F., & Espié, S. (2022). Rider in the Loop Dynamic Motorcycle Simulator: An Instrumentation Strategy Focused on Human Acceptability. *Electronics*, 11(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/electronics11172690>
- ONISR. (2024). Accidentalité routière 2023 en France.
- Schwab, A. L., & Meijaard, J. P. (2013). A review on bicycle dynamics and rider control. *Vehicle System Dynamics*, 51(7), 1059-1090. <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.793365>