



HAL
open science

Simulateurs de conduite et adéquation architecture / modèles : impact sur le “ mal du simulateur ”

Pauline Michel

► To cite this version:

Pauline Michel. Simulateurs de conduite et adéquation architecture / modèles : impact sur le “ mal du simulateur ”. Automatique. Université Paris-Saclay, 2022. Français. NNT: 2022UPAST173 . tel-04357160

HAL Id: tel-04357160

<https://theses.hal.science/tel-04357160>

Submitted on 21 Dec 2023

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.

Simulateurs de conduite et adéquation architecture / modèles : impact sur le « mal du simulateur »

*Driving simulators and architecture / models adequacy: impact on
"simulator sickness"*

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n°580 : sciences et technologies de l'information et de la
communication (STIC)
Spécialité de doctorat : Robotique
Graduate School : Sciences de l'ingénierie et des systèmes. Référent : Faculté des sciences
d'Orsay

Thèse préparée dans l'unité de recherche **SATIE (Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS)**, sous la direction de **Stéphane ESPIÉ**, Directeur de recherche, et la co-direction de **Samir BOUAZIZ**, Professeur

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 19 décembre 2022, par

Pauline MICHEL

Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

Pierre BLAZEVIC Professeur, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines	Président
Jean-Rémy CHARDONNET Maître de conférences, HDR, Arts et Métiers	Rapporteur & Examineur
Kurosh MADANI Professeur, Université Paris-Est Créteil	Rapporteur & Examineur
Abderrahmane KHEDDAR Directeur de recherche, CNRS / Université de Montpellier	Examineur
Laure LEROY Maîtresse de conférences, HDR, Université Paris 8 Vincennes – Saint- Denis	Examinatrice

Titre : Simulateurs de conduite et adéquation architecture / modèles : impact sur le « mal du simulateur »

Mots clés : simulateur de conduite, mal du simulateur, humain-dans-la-boucle, instrumentation, contrôlabilité

Résumé : Le « mal du simulateur », qui s'apparente jusqu'à un certain point au mal des transports, est particulièrement problématique. La compréhension des causes du mal du simulateur et l'identification de procédés pour réduire l'occurrence de ce dernier sont des enjeux importants dans la mesure où elle introduit un biais double dans les résultats acquis : la population étudiée est filtrée « à la porte » et où le conducteur qui souffre de mal du simulateur risque d'avoir des comportements de conduite altérés.

L'hypothèse que nous défendons dans le cadre de cette thèse concerne la relation entre « contrôlabilité » du système (le simulateur) et mal du simulateur. En simulation de conduite, le conducteur fait partie intégrante de la boucle : il initie les mouvements et reçoit les réponses du système.

Notre hypothèse est que, dans ce cadre, un mauvais contrôle du déplacement du véhicule simulé induit des déplacements erratiques, perçus par le conducteur comme ne correspondant pas à ses attentes (du fait de son expérience de conduite antérieure) et donc non-acceptables.

Pour tester cette hypothèse, nous avons repensé les modalités d'interfaçage conducteur/simulateur d'un simulateur de conduite moto préexistant : architecture matérielle et logicielle, structure capteurs/actionneurs de la colonne de direction, modèle de véhicule implémenté. Le simulateur, dans sa version actuelle, permet un meilleur degré de contrôlabilité par le conducteur pour des vitesses de déplacement moyennes à hautes.

Title: Driving simulators and architecture / models adequacy: impact on "simulator sickness"

Keywords: driving simulator, simulator sickness, human-in-the-loop, instrumentation, controllability

Abstract: "Simulator sickness," which is to some extent similar to motion sickness, is particularly problematic. Understanding the causes of simulator sickness and identifying ways to reduce its occurrence are important issues insofar as, on the one hand, the "at the door" filtering of the population studied on the simulator (people who are not susceptible) introduces bias in the results acquired and, on the other hand, a driver who suffers from simulator sickness is likely to behave differently in terms of their driving, which also introduces bias.

The hypothesis we defend in this thesis concerns the relationship between the "controllability" of the system (the simulator) and simulator sickness.

In driving simulation, the driver is an integral part of the loop: they initiate the movements and receive the system responses. Our hypothesis is that, in this context, a poor control of the simulated vehicle movement induces erratic movements, perceived by the driver as not corresponding to their expectations (because of their previous driving experience) and therefore unacceptable.

To evaluate this hypothesis, we have redesigned the rider/simulator interfacing modalities of a pre-existing motorcycle simulator: hardware and software architecture, sensor/actuator structure of the steering column, and implemented vehicle model. In its current version, the simulator allows a higher degree of controllability by the driver for medium to high speeds.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M. Jean-Rémy Chardonnet et M. Kurosh Madani, de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de mon manuscrit. Merci à eux, et merci à M. Pierre Blazevic, M. Abderrahmane Kheddar, et Mme Laure Leroy d'avoir accepté d'évaluer mes travaux de thèse.

Merci, ensuite, à toutes les personnes qui ont contribué scientifiquement à cette thèse. Merci à toutes les personnes qui y ont contribué « humainement ». Merci à toutes les personnes qui y ont contribué sur les deux plans à la fois.

A commencer par mon directeur et mon co-directeur de thèse : Stéphane, Samir, merci pour tout. Si je devais dresser une liste exhaustive des raisons pour lesquelles je voudrais vous remercier, elle serait bien trop longue donc je me contenterai de quelques exemples : merci pour votre confiance dans la refonte du simulateur moto qui était déjà là avant moi, pour votre disponibilité (matinale et tardive), pour vos conseils, pour votre soutien. Merci pour les longues sessions de relecture et vos retours, en direct ou à distance, que ce soit sur ce manuscrit ou sur mes autres écrits. Merci, Stéphane, d'être toujours là pour répondre à mes questions sur la conduite moto.

Merci à mes collègues du laboratoire, qui ont tous joué leur rôle, que ce soit par leur aide technique – pour ça, merci Flavien et Isabelle, par leur habitude de venir me chercher pour aller manger au restaurant universitaire – pour ça, merci aux autres doctorants du laboratoire, ou par leurs questions de plus en plus fréquentes sur l'avancement de mon développement, de mes écrits, de mon manuscrit – merci pour la motivation et les conseils associés.

Merci Bruno de demander « qu'est-ce que je peux faire pour t'aider ? » toujours au bon moment. Merci à toi et à toute l'équipe enseignante de l'IUT de Cachan de m'avoir fait confiance pour y enseigner, à l'IUT, sur Zoom, et même au ski. C'est aussi pour enseigner que je suis là.

Merci à toutes les personnes appelées « participants » dans ce manuscrit d'avoir accepté de participer à mes expérimentations.

Sur un dernier point, merci à ma famille, au sens large : mes parents, mes frères, mon fiancé, ma belle-famille, mes grands-parents (cette fois, on dirait que j'en ai fini avec l'école !). Merci d'avoir toujours cru en moi, surtout dans les moments où je n'y croyais plus moi-même. Merci de me rappeler que d'autres choses sont importantes. Depuis que j'ai commencé cette thèse, j'ai « gagné » un neveu, deux nièces et un filleul, et c'est un cadeau incroyable de la vie. Arthur, Eva, Jules, Rose, pour le moment vous ne pouvez pas lire ces mots, mais j'espère de tout cœur que vous trouverez ce qui vous passionne dans la vie et je serai là pour vous soutenir et m'émerveiller des personnes formidables que je suis sûre que vous deviendrez.

Merci Damien, pour tout. Pour une fois, les mots me manquent, mais tu sauras deviner.

CONTENU

Remerciements.....	5
Contenu	7
Table des illustrations.....	11
Introduction	15
1 Contexte, versant n°1 : le conducteur	19
1.1 La vision.....	21
1.1.1 D'un point de vue neurophysiologique.....	21
1.1.2 Pour la conduite.....	24
1.2 Le système vestibulaire	25
1.2.1 D'un point de vue neurophysiologique.....	25
1.2.2 Pour la conduite.....	26
1.3 Le sens haptique	27
1.3.1 Le toucher.....	27
1.3.2 La proprioception	28
1.3.3 Pour la conduite.....	29
1.4 L'intégration multisensorielle	30
1.5 Le modèle interne	31
1.6 Conclusion partielle.....	33
2 Contexte, versant n°2 : les simulateurs de conduite	35
2.1 Considérations générales sur la simulation « humain-dans-la-boucle »	35
2.2 Les simulateurs de conduite automobile.....	37
2.3 Les simulateurs de conduite moto	42
2.3.1 Les simulateurs de moto Honda.....	43
2.3.2 Et ceux d'après.....	46
2.4 Conclusion partielle.....	54
3 Le simulateur ressenti par le conducteur vs le conducteur dans la boucle	55
3.1 Le mal du simulateur.....	55
3.2 Questions ouvertes pour l'instrumentation d'un simulateur de conduite....	58
3.3 Modalités d'interface capteurs/actionneurs : exemples pour un simulateur de conduite	60
3.4 Conclusion partielle.....	63
4 Notre simulateur de conduite moto.....	65
4.1 Description générale	65
4.2 Structure générale.....	67
4.3 Interfaces conducteur/moto et monde simulés.....	70
5 Approche centrée contrôlabilité, versant n°1 : guidon de moto et stimuli haptiques	71
5.1 Considérations générales sur la contrôlabilité et l'acceptabilité	72
5.2 La question du guidon dans la conduite moto.....	72
5.2.1 ... pour le conducteur.....	73
5.2.2 ... et pour le système	73
5.3 Contraintes de conception...	75
5.3.1 ... liées au conducteur	75

5.3.2	... et liées au système	75	
5.4	Architecture.....	77	
5.5	Mesure de l'action du conducteur.....	79	
5.6	Restitution visuelle dans notre système preuve de concept : choix de conception	80	
5.6.1	Fréquence de rafraîchissement de l'image	81	
5.6.2	Retard sensoriel et délai de transport introduit par le système	81	
5.6.3	Conclusion sur la restitution visuelle.....	82	
5.7	Restitution haptique dans notre système preuve de concept : choix de conception	82	
5.7.1	Sensibilité fréquentielle	83	
5.7.2	Pilotage du guidon motorisé	84	
5.7.3	Retard sensoriel et délai de transport introduit par le système	84	
5.7.4	Conclusion sur la restitution haptique.....	85	
5.8	Conclusion partielle.....	85	
6	Expérimentation n°1 : adéquation modèles / stimuli sensoriels : quel impact sur la contrôlabilité des systèmes ?.....	87	
6.1	Motivations.....	88	
6.2	Méthodologie.....	88	
6.2.1	Participants	88	
6.2.2	Dispositif expérimental	89	
6.2.3	Tâche et plan expérimental.....	90	
6.2.4	Procédure	94	
6.2.5	Variables indépendantes.....	97	
6.2.6	Variables dépendantes.....	98	
6.3	Résultats.....	99	
6.3.1	Durée de l'oscillation	99	
6.3.2	Amplitude de l'oscillation	101	
6.3.3	Amplitude du couple appliqué.....	103	
6.3.4	Score MISC.....	105	
6.4	Discussion	106	
6.4.1	Effet de l'entraînement	106	
6.4.2	Effet de l'incongruence modèle dynamique / retour visuel.....	108	
6.4.3	Ressenti subjectif des participants	110	
6.5	Résultats complémentaires sur le POC.....	110	
6.6	Conclusion partielle et perspectives.....	113	
7	Approche centrée contrôlabilité, versant n°2 : Application à notre simulateur moto	117	
7.1	Considérations générales sur la différence entre conduite d'une moto et conduite d'un simulateur moto.....	118	
7.2	Un ensemble de modèles	119	
7.3	Corps dynamique n°1 : la colonne de direction	121	
7.3.1	Flux de données capteurs/actionneurs de la colonne de direction	121	
7.3.2	Le degré de liberté de l'angle de guidon	122	
7.4	Corps dynamique n°2 : la plate-forme mobile.....	125	
7.4.1	Flux de données capteurs/actionneurs de la plate-forme mobile	125	
7.4.2	Le degré de liberté de l'angle de roulis.....	127	
7.5	Résultats.....	130	
7.6	Conclusion partielle et perspectives de développement	132	

8	Expérimentation n°2 : adéquation modèle de moto / stimuli sensoriels : quel impact sur la contrôlabilité d'un simulateur moto ?.....	135
8.1	Méthodologie prévue.....	136
8.1.1	Participants.....	136
8.1.2	Dispositif expérimental.....	137
8.1.3	Tâche 137	
8.1.4	Plan expérimental.....	138
8.1.5	Procédure	139
8.2	Résultats attendus.....	140
8.3	Méthodologie adoptée	142
8.3.1	Participants.....	142
8.3.2	Dispositif expérimental.....	143
8.3.3	Tâche 143	
8.3.4	Plan expérimental.....	144
8.3.5	Procédure	145
8.4	Résultats obtenus et discussion.....	146
8.4.1	Mesures objectives	146
8.4.2	Entretiens	151
8.4.3	Mesures subjectives.....	152
8.5	Conclusion partielle et perspectives	155
	Conclusion et perspectives.....	157
	Bibliographie.....	161
	Annexe 1	174
	Annexe 2	176
	Annexe 3	178

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1.1 Les 5 sens d'après Aristote, représenté par les organes sensoriels : oreille (l'ouïe), œil (la vision), langue (le goût), nez (l'odorat) et peau (le toucher).....	20
Figure 1.2 Représentation schématique du principe de la perception humaine : détection d'un stimulus physique, transduction, traitement et génération d'une action résultante	20
Figure 1.3 Situation du spectre visible dans le spectre électromagnétique.....	22
Figure 1.4 Schéma en coupe d'un œil humain.....	23
Figure 1.5 Les récepteurs sensoriels impliqués dans la vision : (a) un bâtonnet ; (b) un cône	24
Figure 1.6 Schéma de l'oreille interne : 1 Cochlée ; 2 Saccule ; 3 Utricule ; 4 Ampoule du canal postérieur ; 5 Ampoule du canal externe ; 6 Ampoule du canal supérieur ; 7 Canal endolymphatique.....	26
Figure 1.7 Localisation des mécanorécepteurs sur une vue en coupe de la peau (Halata & Baumann, 2008)	28
Figure 2.1 Entraînement au sol des pilotes de l'Armée de l'air française grâce au simulateur de vol « Tonneau Antoinette » (1910)	35
Figure 2.2 (a) Simulateur EF Bike d'ECA Faros ; (b) simulateur Riding Trainer d'Honda.....	37
Figure 2.3 Diagramme de principe d'un simulateur de conduite (Bruck et al., 2021)	38
Figure 2.4 Simulateur de tenue de route et de confort General Motors (Kohr, 1961)	39
Figure 2.5 Simulateur Daimler-Benz (Drosdol & Panik, 1985; Käding & Hoffmeyer, 1995)	39
Figure 2.6 Simulateur VTI (Nordmark et al., 1984).....	40
Figure 2.7 Simulateurs plus récents (après l'an 2000) : (a) Simulateur NADS ; (b) Simulateur Toyota	41
Figure 2.8 Simulateurs « des années 2020 » : (a) BMW Sapphire Space ; (b) Renault ROADS	41
Figure 2.9 Prototype n°1 du simulateur de moto Honda	43
Figure 2.10 Prototype n°2 du simulateur de moto Honda.....	44
Figure 2.11 Simulateur de moto Honda/Université de Tokyo (Chiyoda et al., 2000)	45
Figure 2.12 Simulateur de moto BMW Motorrad (Guth et al., 2016).....	47
Figure 2.13 Simulateur de moto Cruden	47
Figure 2.14 Simulateur de moto MotorcycleSim, Université de Nottingham (Stedmon et al., 2011)	47
Figure 2.15 Simulateur de moto DESMORI, Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (Will, 2017).....	48
Figure 2.16 Simulateur de moto Université de Padoue (Cossalter, Lot, Massaro, et al., 2011).....	48
Figure 2.17 Simulateur de moto MORIS, Ecole normale supérieure de Pise (Ferrazzin et al., 2003).....	48
Figure 2.18 Simulateur de moto MOTORIST, Université Technique de Delft (Grottoli, 2021)	48
Figure 3.1 Processus de filtrage dû au mal du simulateur	56
Figure 3.2 (a) Représentation schématique d'une interface capteur virtuel/actionneur virtuel (en bleu : actions du conducteur, et en rouge : données d'entrée et de sortie du modèle de véhicule) ; (b) Exemples d'une interface capteur virtuel/actionneur virtuel : écran, souris et clavier.....	62
Figure 3.3 (a) Représentation schématique d'une interface capteur réel/actionneur virtuel (en bleu : actions du conducteur, et en rouge : données d'entrée et de sortie du modèle de véhicule). (b) Un exemple d'interface capteur réel/actionneur virtuel : un joystick volant	62
Figure 3.4 (a) Représentation schématique d'une interface capteur réel/actionneur réel (en bleu : actions du conducteur, et en rouge : données d'entrée (relations A et B) et de sortie (relation C) du modèle de véhicule ; relation D : couplage physique). (b) Exemple d'interface capteur réel/actionneur réel : la colonne de direction de notre simulateur de conduite moto.....	63
Figure 4.1 Notre simulateur de conduite moto	65

Figure 4.2 (a) CAO du simulateur ; (b) Photo du simulateur	67
Figure 4.3 (a) Architecture fonctionnelle antérieure du simulateur avec calcul du modèle de véhicule sur un PC standard ; (b) Architecture fonctionnelle du simulateur avec calcul du modèle de véhicule sur un PC xPC Target (Matlab/Simulink temps réel)	68
Figure 4.4 Architecture matérielle/logicielle générale du simulateur moto : véhicule simulé (zone en pointillé à gauche) et environnement de simulation (zone en traitillé à droite)	69
Figure 5.1 Illustration des interactions entre conducteur et simulateur de conduite	71
Figure 5.2 Représentation schématique des interactions entre le conducteur et notre système POC.....	77
Figure 5.3 Guidon de moto motorisé à retour haptique utilisé dans notre système POC.....	78
Figure 5.4 Diagramme de déploiement de notre système POC.....	79
Figure 5.5 Localisation de la jauge de contrainte utilisée pour mesurer le couple appliqué par le conducteur sur le guidon.....	80
Figure 5.6 Représentation sous forme de schéma-bloc de la commande position-vitesse du servo-moteur	84
Figure 6.1 Représentation schématique du système utilisé pour l'expérimentation pilote.....	89
Figure 6.2 Participant pendant l'expérimentation pilote	90
Figure 6.3 Schéma du pendule simple, où la position d'équilibre ($\theta = 0^\circ$) est représentée en gris et le sens de l'observation pour le participant est représenté par l'œil.....	90
Figure 6.4 Représentation visuelle du pendule lourd H (en haut) et léger L (en bas) dans une position angulaire proche du participant	91
Figure 6.5 Plages angulaires d'intérêt du pendule simple pour l'expérimentation pilote : l'intervalle <i>Icible</i> que les participants devaient viser est délimité en vert ; la plage de débattement possible est délimitée en gris.....	92
Figure 6.6 Exemples de la scène visuelle pendant l'expérimentation pilote : l'encadré vert correspond au cas où le participant a accompli sa tâche pour l'oscillation en cours – la position maximale atteinte par le pendule est dans l'intervalle désiré <i>Icible</i>	93
Figure 6.7 Frise chronologique représentant le déroulement de l'expérimentation pilote pour un participant	97
Figure 6.8 Durée moyenne de l'oscillation (en secondes) en fonction de la variante expérimentale (* : $p < 0,05$, *** : $p < 0,001$, noir : effet de l'entraînement, rouge : effet de l'incongruence)	100
Figure 6.9 Coefficient de variation de la durée de l'oscillation (en pourcentage) en fonction de la variante expérimentale (* : $p < 0,05$, ** : $p < 0,01$, *** : $p < 0,001$, noir : effet de l'entraînement, rouge : effet de l'incongruence).....	101
Figure 6.10 Amplitude moyenne de l'oscillation (en centièmes de degré) en fonction de la variante expérimentale (* : $p < 0,05$, ** : $p < 0,01$, *** : $p < 0,001$, noir : effet de l'entraînement, rouge : effet de l'incongruence).....	102
Figure 6.11 Coefficient de variation de l'amplitude de l'oscillation (en pourcentage) en fonction de la variante expérimentale (* : $p < 0,05$, *** : $p < 0,001$, noir : effet de l'entraînement, rouge : effet de l'incongruence).....	103
Figure 6.12 Amplitude moyenne du couple appliqué (en Newton mètre) en fonction de la variante expérimentale (** : $p < 0,01$, *** : $p < 0,001$, noir : effet de l'entraînement, rouge : effet de l'incongruence)	104
Figure 6.13 Coefficient de variation de l'amplitude du couple appliqué (en pourcentage) en fonction de la variante expérimentale (* : $p < 0,05$, ** : $p < 0,01$, rouge : effet de l'incongruence).....	105
Figure 6.14 Exemple de données collectées pendant l'expérimentation pilote : couple courant mesuré par le servo-moteur et couple « d'entraînement » calculé (en Nm dans les deux cas) en fonction du temps	

(écoulé depuis le début de l'expérimentation, en s) pour deux actions de contrôle successives d'un participant.....	111
Figure 6.15 Exemple de résultats de l'expérimentation pilote : position angulaire du pendule (théorique ou avec action humaine, en °), vitesse angulaire du pendule (théorique ou avec action humaine, en °/s) et couple appliqué par le participant (en Nm) en fonction du temps (écoulé depuis le début de l'expérimentation, en s), pour deux essais consécutifs : (a) tâche non réussie (b) tâche réussie.....	113
Figure 6.16 Frise chronologique représentant le déroulement révisé de l'expérimentation pour un participant (l'étape à modifier est indiquée par l'encadré pointillé)	115
Figure 7.1 Représentation imagée de la différence des paramètres de stabilité d'une moto simulée (cas représenté par le bol rouge) par rapport à ceux d'une moto réelle (cas représenté par le bol noir). La balle représente la situation à l'instant $t = t_0$ où le conducteur effectue une action (représentée par la flèche bleue).....	119
Figure 7.2 Architecture fonctionnelle du simulateur dans sa version actuelle.....	120
Figure 7.3 (a) Localisation des capteurs et actionneurs du sous-système « guidon motorisé à retour haptique » ; (b) CAO du sous-système « contrôle de la distance guidon/conducteur » et localisation des capteurs et actionneurs de ce sous-système.....	121
Figure 7.4 Données utilisées pour déterminer le couple de direction en fonction des données du servomoteur et la jauge de contrainte (données collectées dans le cas de notre système POC) : couple courant mesuré par l'actionneur (en Nm) en fonction de la valeur mesurée par la jauge de contrainte (valeur sans dimension codée sur 12 bits, allant de 0 à 4095). Ces mesures ont été faites sans aucune action humaine sur le système.....	124
Figure 7.5 Logigramme du calcul du couple de direction.....	124
Figure 7.6 Localisation des capteurs de force (utilisés pour le calcul du couple de roulis) ; (b) CAO des jambes avant (utilisées pour la restitution du mouvement de roulis et de tangage) ; (c) CAO de la glissière arrière (utilisée pour la restitution du mouvement de lacet).....	126
Figure 7.7 Données utilisées pour déterminer la loi de correction des mesures de force en fonction de l'angle de roulis du châssis : valeurs mesurées par les deux capteurs de force – (a) capteur de gauche et (b) capteur de droite – (valeurs sans unité codées sur 12 bits, allant de 0 à 4095) en fonction de l'angle de roulis du châssis (en °). Ces mesures ont été faites sans aucune action humaine sur le système.....	129
Figure 7.8 Logigramme du calcul du couple de roulis.....	130
Figure 7.9 Mesures expérimentales illustrant l'effet action-réaction entre une action du pilote en termes de couple de direction, représentée ici par la valeur mesurée par la jauge de contrainte (valeur sans dimension sur 12 bits allant de 0 à 4095, en violet) et la réaction du véhicule virtuel, représentée ici par la vitesse réelle du guidon (valeur en centième de °/s, en lavande) et la différence entre les valeurs mesurées par le capteur de force gauche et droit du châssis (valeur sans dimension entre -123 et 123, en bleu-vert), dont une évolution signifie que le châssis bouge. Toutes les valeurs sont représentées en fonction du temps (écoulé depuis le début de l'expérience, en s).....	131
Figure 8.1 Frise chronologique représentant le déroulement du projet d'expérimentation pour un participant.....	140
Figure 8.2 Représentation schématique des résultats attendus pour l'expérimentation.....	142
Figure 8.3 Visuel de l'environnement routier dans lequel se déplaçaient les participants pendant notre expérimentation (vue tronquée).....	144
Figure 8.4 Frise chronologique représentant le déroulement de l'expérimentation pour un participant...	146
Figure 8.5 Trajectoires des participants de l'expérimentation dans les cas avec une vitesse de déplacement moyenne (72 km/h) : position latérale (voie en m) en fonction de la position longitudinale (point kilométrique en m) dans la zone des 5 premières voitures arrêtées (représentées par les rectangles noirs)	

.....	147
Figure 8.6 Taux d'échec et de réussite selon la session de conduite.....	148
Figure 8.7 Trajectoires sans sortie de route des participants de l'expérimentation dans les cas avec une vitesse de déplacement moyenne (72 km/h) : position latérale (voie en m) en fonction de la position longitudinale (point kilométrique en m) dans la zone des 5 premières voitures arrêtées (représentées par les rectangles noirs).....	150
Figure 8.8 Couple de roulis exercé par les participants pendant leur déplacement dans le cas de la variante expérimentale : Vitesse moyenne x Modèle fonctionnel x Avec rendu d'inclinaison, en fonction de la position longitudinale (point kilométrique en m) et dans la zone des 5 premières voitures arrêtées (représentées par les rectangles noirs).....	151
Figure 8.9 Nuages de mots reportant les retours faits par les participants pendant les entretiens, pour les cas avec une vitesse de déplacement moyenne (72 km/h).....	152
Figure 8.10 Scores d'état de présence (résultat des questionnaires Presence Questionnaire) pour les sessions de conduite au cours desquelles le comportement de la moto virtuelle était respectivement jugé le moins et le plus réaliste (** : $p < 0,01$).....	153
Figure 8.11 Scores aux sous-échelles des questionnaires NASA-TLX pour les sessions de conduite au cours desquelles le comportement de la moto virtuelle était respectivement jugé le moins (noté -) et le plus réaliste (noté +) (* : $p < 0,05$, ** : $p < 0,01$ et *** : $p < 0,001$).....	154
Figure 8.12 Scores de mal du simulateur (résultat des questionnaires Simulator Sickness Questionnaire) pour les sessions de conduite au cours desquelles le comportement de la moto virtuelle était respectivement jugé le moins et le plus réaliste (***) : $p < 0,001$	155

INTRODUCTION

Les conducteurs moto sont surreprésentés dans l'accidentalité routière. En France, un conducteur moto a environ 25 fois plus de risque d'être tué qu'un conducteur automobile (Conseil National de la Sécurité Routière - Comité des Experts, 2020). Une étude belge a montré qu'un conducteur moto a environ 57 fois plus de risque d'être tué ou blessé fatalement qu'un conducteur automobile, et plus de 2 fois plus qu'un cycliste, sachant que les cyclistes représentent la deuxième catégorie la plus à risque parmi les usagers de la route (Martensen, 2014). Les statistiques de la Commission Européenne montrent de plus que les conducteurs de deux-roues motorisés représentent 17,8% des blessures fatales lors d'un accident de la route dans toute l'Union Européenne (Commission européenne, 2020). L'étude des comportements des conducteurs moto est donc un enjeu important. Du fait des risques encourus, une solution utilisée par les chercheurs est l'étude des comportements en utilisant des simulateurs de conduite.

Il faut noter qu'un simulateur de conduite, au même titre qu'un oscilloscope par exemple, est un outil d'observation et de mesure. Un simulateur de conduite permettra dans tous les cas d'observer des phénomènes et de collecter des données, mais, de la même manière qu'un oscilloscope si l'on utilise des sondes non étalonnées, les observations et les mesures faites grâce à un simulateur de conduite « mal conçu » (ou « mal réalisé ») peuvent être fausses et conduire à des conclusions biaisées. L'équivalent de l'étalonnage d'une sonde d'oscilloscope, pour un simulateur de conduite construit pour étudier des comportements humains, est le paramétrage du simulateur de sorte à obtenir des comportements de conduite les plus proches possibles de la réalité. On peut par exemple vouloir observer les interactions du conducteur avec des systèmes intégrés au véhicule (système multimédia, ...) ou avec d'autres usagers de la route. La contrôlabilité du véhicule virtuel est une condition nécessaire pour que ces interactions soient observées sans biais. Il ne s'agit cependant pas d'une condition suffisante, dans la mesure où tous les éléments de contexte de la conduite doivent eux aussi être simulés avec des niveaux de réalisme « suffisants », mais il s'agit là d'un autre défi qui sort du périmètre de nos travaux de thèse.

La simulation de conduite moto est complexe, car la conduite d'une moto est complexe : pour contrôler sa trajectoire le conducteur interagit en permanence avec son véhicule. Cette interaction est nécessaire du fait du caractère naturellement instable des deux-roues.

Comme pour les simulateurs automobiles, un problème récurrent concerne l'occurrence du phénomène dit du « mal du simulateur ». Cette question est particulièrement

problématique car les résultats obtenus sont biaisés : d'abord un biais de sélection, du fait de la limitation de la population observée à la population non sensible au mal du simulateur, et d'autre part un biais de mesure, parce qu'un conducteur qui ne se sent pas en contrôle et souffre du mal du simulateur risque d'avoir un comportement de conduite altéré par rapport à celui qu'il aurait dans une situation où il se sentirait en contrôle et « à l'aise ».

Notre thèse est que le mal du simulateur peut être induit par un manque de contrôlabilité du simulateur : l'être humain dans la boucle ne parvient pas à contrôler le véhicule virtuel du fait d'incohérences entre ses actions et le comportement du véhicule virtuel, qui ne correspond pas à ses attentes. Nous défendons l'hypothèse que ces incohérences proviennent souvent de l'usage combiné d'un modèle de véhicule et d'une architecture de simulateur de complexités trop différentes. C'est le cadre des travaux présentés dans ce manuscrit.

Nos travaux sont centrés sur la simulation de conduite moto, mais nous pensons que les résultats de ce travail de thèse et l'approche que nous proposons, qui est centrée sur la contrôlabilité du système, sont généralisables à d'autres types de simulateurs de conduite et très probablement à d'autres systèmes « humain-dans-la-boucle ».

L'instrumentation d'un système est généralement fondée sur la connaissance de son environnement et sur les spécifications des cas d'utilisation de ce système. L'instrumentation d'un simulateur de conduite pose des questions plus complexes : au centre du simulateur se trouve un être humain, le conducteur, qui, par ses actions, initie le déplacement du véhicule virtuel et les mouvements de la plate-forme mobile, et qui est le récepteur des stimuli sensoriels que le simulateur de conduite est capable de produire. Nous allons donc dans un premier temps étudier le fonctionnement de la perception humaine et confronter ces informations à l'étude des restitutions sensorielles proposées par les simulateurs de conduite de moto existants à ce jour. Cette étude fait l'objet des chapitres 1, 2 et 3. Le chapitre 1 introduit le contexte de l'instrumentation d'un simulateur de conduite du point de vue des systèmes sensoriels humains qui sont mobilisés pour accomplir la tâche de conduite d'un véhicule. Le chapitre 2 présente un état de l'art des simulateurs de conduite automobile et de moto, en mettant l'accent principalement sur les méthodes de restitution sensorielle qui sont utilisées dans les simulateurs existants. Enfin, le chapitre 3 décrit les problématiques toujours posées pour la simulation de conduite « humain-dans-la-boucle » et notamment les hypothèses avancées dans des travaux précédents pour expliquer l'occurrence du mal du simulateur. Ce dernier chapitre de contextualisation explique notre point de vue sur le rôle de la contrôlabilité dans les

interactions conducteur/simulateur et son implication pour les stratégies de conception d'un simulateur.

Pour démontrer notre hypothèse et en nous fondant sur l'état de l'art que nous avons présenté, nous allons, dans une première étape, faire évoluer le système de pilotage du guidon d'un simulateur de conduite moto préexistant, présenté dans le chapitre 4. Le rôle du guidon dans la conduite d'une moto est en effet l'une des raisons pour lesquelles la tâche de contrôle de la trajectoire du véhicule est complexe. Ce travail est décrit dans les chapitres 5 et 6.

Dans une deuxième étape, nous allons intégrer notre système de retour d'effort au guidon à notre prototype de simulateur moto, en mettant en place une architecture électronique distribuée en charge du calcul des différents modèles mis en jeu. Nous allons de plus raffiner le modèle de véhicule préexistant et développer un modèle de véhicule simplifié pour préparer un scénario expérimental permettant d'étudier l'impact pour le contrôle du simulateur moto par des conducteurs, de l'adaptation de la complexité du modèle de véhicule à la capacité de l'architecture du simulateur à restituer au conducteur le comportement du véhicule. Ce travail est décrit dans les chapitres 7 et 8.

1 CONTEXTE, VERSANT N°1 : LE CONDUCTEUR

Quel que soit le mouvement (volontaire) que notre corps va exécuter, il nous faut, au préalable, avoir pris connaissance de notre environnement (acquérir de l'information). Cette acquisition d'information est rendue possible par une multitude de récepteurs sensoriels qui sont disséminés dans tout le corps et qui traduisent l'énergie de l'environnement et/ou du corps en signaux sensoriels que le système nerveux central peut traiter et interpréter.

Mais les récepteurs ne sont pas les seuls éléments pris en compte pour la perception de notre environnement, l'anticipation sur le comportement de ce dernier et sur l'effet de nos actions est nécessaire pour garantir une prédictibilité et donc un contrôle de l'état futur. L'objectif de cette section est de comprendre le fonctionnement neurophysiologique des principaux systèmes sensoriels impliqués dans la sensorimotricité humaine, qui s'appuie abondamment sur des modèles internes, dont nous détaillerons le rôle. Nous introduirons ensuite la notion de modèle interne qui permet d'anticiper et donc de contrôler de manière « fine », mais crée aussi des « attentes ».

Comprendre le fonctionnement des systèmes sensoriels humains est essentiel dans le cadre de nos travaux qui portent sur la conception d'un simulateur de conduite moto. En effet, au centre du simulateur se trouve un être humain, le conducteur, qui initie les mouvements et qui est le récepteur des stimuli sensoriels que le simulateur de conduite est capable de reproduire ; étudier le fonctionnement de la perception humaine va donc nous permettre de mieux comprendre les interactions entre le conducteur et le « système simulateur » et d'améliorer les modalités de ces interactions.

Nos cinq sens – la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût et le toucher – (Figure 1.1) nous permettent de percevoir notre environnement. Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéresserons à deux de ces cinq sens qui sont particulièrement pertinents pour l'activité de conduite, à savoir la vue et le toucher. Nous aborderons également un autre système sensoriel situé dans l'oreille interne, mais qui n'est pas le système auditif : le système vestibulaire qui est impliqué dans la gestion de l'équilibre. Aux cinq sens universellement connus s'ajoute un sens moins connu mais primordial dans le cadre de la sensorimotricité humaine sur lequel nous reviendrons également : la proprioception.



Figure 1.1 Les 5 sens d'après Aristote, représenté par les organes sensoriels : oreille (l'ouïe), œil (la vision), langue (le goût), nez (l'odorat) et peau (le toucher)
 (Source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Five_senses.jpg)

Les différents sens prennent naissance grâce à des cellules spécialisées appelées récepteurs sensoriels. Le processus complet de la perception humaine est représenté schématiquement en Figure 1.2.

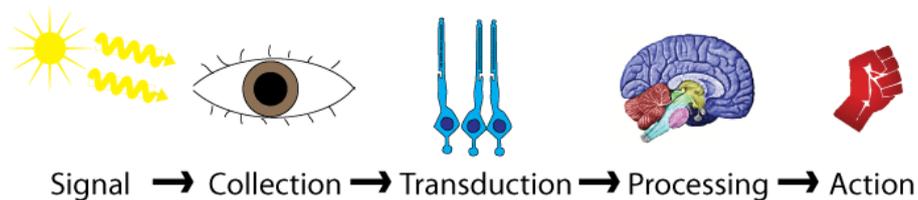


Figure 1.2 Représentation schématique du principe de la perception humaine : détection d'un stimulus physique, transduction, traitement et génération d'une action résultante
 (Source : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SensoryProcessing.png>)

Il existe en tout cinq types de récepteurs sensoriels qui répondent chacun à des formes d'énergie spécifiques. Le rôle d'un récepteur sensoriel est en fait de traduire, de convertir l'énergie d'un stimulus particulier en message nerveux (signal électrique à destination du système nerveux central pour intégration et interprétation). Le Tableau 1.1 récapitule les récepteurs sensoriels mobilisés par les systèmes sensoriels humains et les stimuli qu'ils permettent de détecter.

Tableau 1.1 Synthèse des systèmes sensoriels humains et des stimuli auxquels ils sont sensibles

Sens	Stimuli détectés	Organe sensoriel	Récepteurs
Vue	Lumière	Œil	Photorécepteurs (rétine)
Ouïe	Son	Oreille	Mécanorécepteurs (cochlée)
Odorat	Chimiques	Nez	Chimiorécepteurs (bulbe olfactif)
Goût	Chimiques	Langue	Chimiorécepteurs (papilles gustatives)
Toucher	Mécaniques (pression, tension)	Peau	Mécanorécepteurs (épiderme, derme et hypoderme)
Proprioception	Mécaniques (vibrations, étirement, tension, variation de position, accélération linéaire et angulaire)	Muscles, articulations, système vestibulaire	Mécanorécepteurs

Les systèmes sensoriels ont deux fonctions possibles :

- fonction exocentrée, quand ils véhiculent des informations provenant de l'environnement, du monde extérieur (par exemple la vision et l'audition ont une fonction exocentrée) ;
- fonction égocentrée, quand ils véhiculent des informations concernant notre propre corps (par exemple la position de nos membres dans l'espace). Le système proprioceptif a une fonction égocentrée : la perception générale de la position et des mouvements de chaque partie de notre corps.

1.1 LA VISION

1.1.1 D'un point de vue neurophysiologique

Le système sensoriel visuel joue un rôle primordial dans la sensorimotricité. Il permet, par un rapide coup d'œil à notre environnement de connaître de nombreux paramètres de notre environnement tels que la position, la taille, la forme, la couleur, la texture des objets ainsi que leur déplacement, leur vitesse et leur direction.

Le système visuel possède des récepteurs sensoriels qui sont capables d'opérer une transduction de l'énergie lumineuse.

La lumière est une onde électromagnétique dont le spectre est restreint : sur l'ensemble des rayonnements électromagnétiques présents dans la nature (allant des rayons gamma aux ondes radio), les photorécepteurs de la rétine sont sensibles uniquement à une fraction de ces longueurs d'onde, entre 400 et 700 nm. C'est le spectre visible (Figure 1.3).

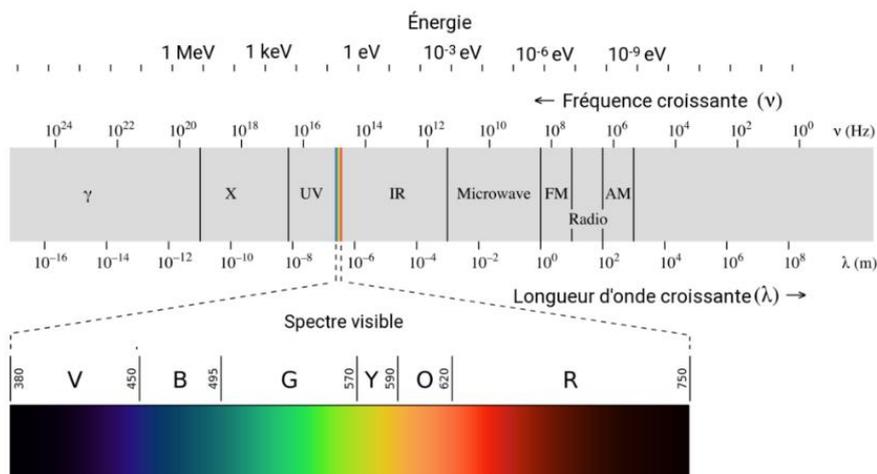


Figure 1.3 Situation du spectre visible dans le spectre électromagnétique
(Source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrumrevised_fr.png)

L'œil (Figure 1.4) est constitué de nombreux éléments, organisés en trois couches : de l'extérieur vers l'intérieur de l'œil, la sclérotique, l'uvée et la rétine. La rétine, la couche la plus profonde de l'œil qui s'étend sur sa partie postérieure, est celle qui contient les photorécepteurs. La lumière traverse la cornée, l'humeur aqueuse, la pupille, le cristallin et l'humeur vitrée avant d'atteindre la rétine.

En plus de permettre la transmission de la lumière jusqu'aux photorécepteurs de la rétine, l'œil a pour fonction d'obtenir une image focalisée sur la rétine (notamment sur la zone ultra-centrale appelée fovéa). Cette focalisation s'opère grâce à la cornée qui est responsable de la réfraction de la lumière vers le cristallin dont la courbure peut être modifiée par l'action des muscles ciliaires en fonction de la distance des objets que l'on regarde, rendant l'accommodation possible.

La quantité de lumière qui rentre dans l'œil est quant à elle contrôlée par l'iris qui se contracte ou se relâche pour moduler la taille de la pupille.

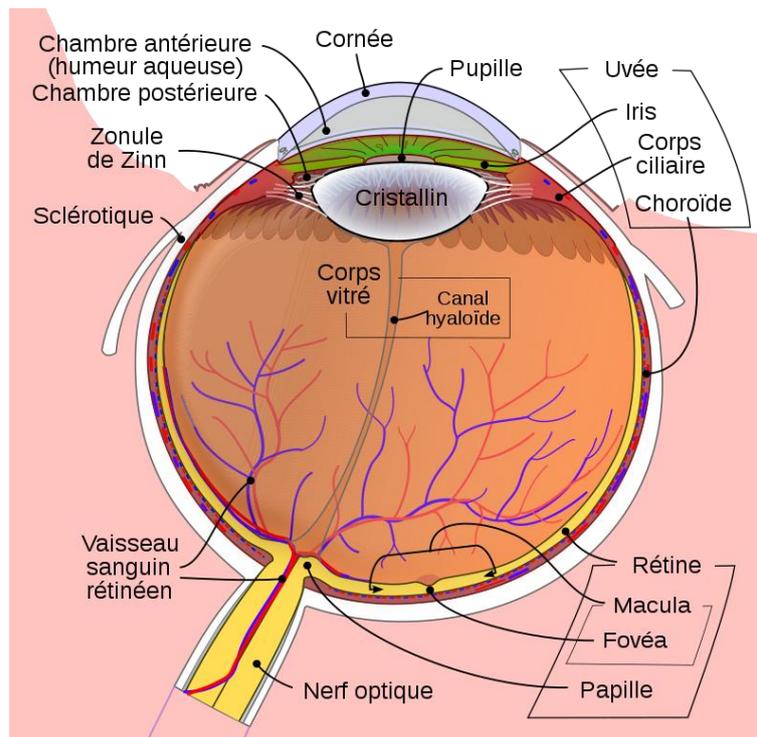


Figure 1.4 Schéma en coupe d'un œil humain

(Source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_diagram_of_the_human_eye_fr.svg)

On retrouve sur la rétine deux types de récepteurs photosensibles (Figure 1.5) qui détectent les signaux lumineux pour opérer la phototransduction :

1. Les bâtonnets, au nombre d'environ 120 millions par œil, qui présentent une résolution spatiale faible, sont très sensibles à la lumière et sont principalement situés à la périphérie de la rétine ;
2. Les cônes, au nombre d'environ 5 millions par œil (soit 25 fois moins que de bâtonnets), qui présentent une résolution spatiale très élevée, sont peu sensibles à la lumière et sont présents principalement au niveau de la zone centrale appelée macula.

La distribution des photorécepteurs est très différente en fonction des zones de la rétine. Les cônes sont absents en périphérie de la rétine, très présents au niveau de la macula et exclusifs au niveau de la fovéa. Pour ce qui est des bâtonnets, c'est l'inverse. La fovéa, qui contient exclusivement des cônes, est donc la région visuelle où l'acuité visuelle est la plus élevée (à 6° de l'axe du regard, l'acuité visuelle est réduite de 75%). Cette répartition de l'acuité visuelle explique pourquoi nous réalisons des mouvements incessants de la tête et des yeux : pour que l'image des objets d'intérêt soit projetée sur la fovéa. Au contraire, la vision périphérique est prise en charge par

les bâtonnets dans les zones périphériques de la rétine. Même si l'acuité visuelle de la vision périphérique est faible, nous l'utilisons pour détecter et estimer les caractéristiques des mouvements autour de nous. La vision périphérique a également pour rôle de nous renseigner sur les mouvements de notre corps dans l'environnement, c'est-à-dire le mouvement propre (Berthoz et al., 1975; Previc, 1992).

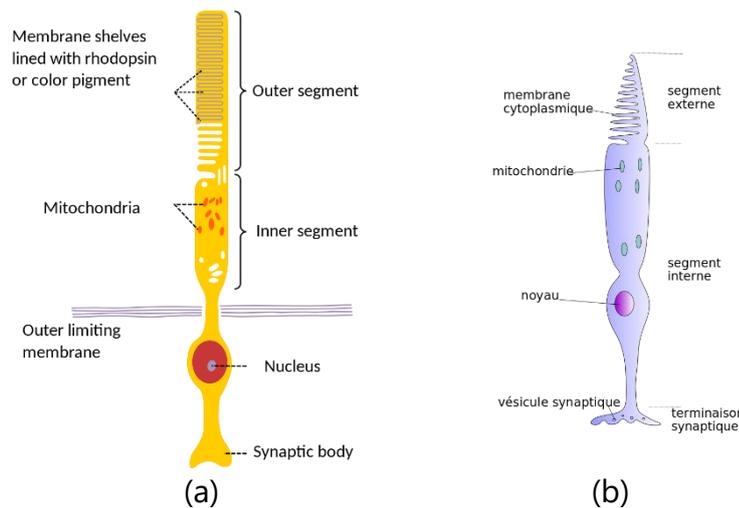


Figure 1.5 Les récepteurs sensoriels impliqués dans la vision : (a) un bâtonnet ; (b) un cône
 (Source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rod_Cell.svg et
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cone_s.svg)

1.1.2 Pour la conduite

Pendant que nous nous déplaçons, la perception visuelle de notre environnement s'appuie sur le flux et les perturbations des images perçues plutôt que sur la forme des objets qui sont dans l'environnement (Gibson, 1950, 1979). En effet, lorsque nous nous déplaçons, notre champ de vision se déplace en sens opposé. C'est de cette manière que Gibson a défini le flux optique : le flux optique est le mouvement apparent des objets, surfaces et contours de la scène visuelle, causé par le mouvement relatif entre l'observateur (l'œil) et la scène (Burton & Radford, 1978; Warren & Strelow, 1985). Le flux optique peut être représenté par un champ de vecteurs où chaque vecteur représente la direction et la vitesse du mouvement d'un point dans la scène visuelle.

La perception visuelle est souvent considérée comme perception prépondérante dans la conduite automobile et en particulier dans la tâche de guidage du véhicule (Summala, 1988).

Les informations visuelles donnent au conducteur une information qualitative et quantitative sur les objets de son environnement et en particulier sur son véhicule, ainsi

qu'une estimation de leur état (position, vitesse, accélération). En approchant d'un obstacle, le conducteur perçoit le délai avant le contact (*Time-To-Collision*, abrégé *TTC*) (Hayward, 1972) grâce au flux optique. En particulier, le taux de dilatation de l'image dudit obstacle sur la rétine est directement utilisé pour le déclenchement et la variation du freinage (Lee, 1976). En outre, l'estimation du *TTC* peut tenir compte de la vitesse d'approche (McLeod & Ross, 1983) dans le cas d'une situation de conduite réelle ou le niveau de détails de l'environnement (Cavallo et al., 1997) ou la vision stéréoscopique (Cavallo & Laurent, 1988) dans le cas d'une situation de conduite simulée. Lors de la prise de virage, le conducteur utilise un autre indice, le *time-to-line-crossing*, soit le *TTC* avec le marquage latéral ou central de la voie (Godthelp, 1986). Land et Lee ont montré que, dans une telle situation, le regard du conducteur est concentré autour d'un point appelé le point tangent (Land & Lee, 1994), dont l'intérêt pour la stabilité du contrôle latéral du véhicule en prise de virage a été confirmé expérimentalement par Mars (Mars, 2008). Enfin, Wilson et ses collègues ont montré une corrélation entre les mouvements des yeux et les mouvements du volant (Wilson et al., 2007).

1.2 LE SYSTEME VESTIBULAIRE

1.2.1 D'un point de vue neurophysiologique

Le système vestibulaire se trouve dans l'oreille interne, au niveau du labyrinthe vestibulaire ou vestibule. Le système vestibulaire joue un rôle essentiel dans la perception des déplacements du corps, de la position de la tête et l'orientation spatiale de la tête par rapport à la gravité (proprioception vestibulaire). Il a aussi des fonctions motrices importantes, notamment pour la stabilisation du regard, de la tête et de la posture (qui sont des mécanismes réflexes). Le réflexe vestibulo-oculaire est le réflexe qui induit des mouvements oculaires contrebalançant les mouvements de la tête pour garder le regard fixé sur un point particulier.

Le labyrinthe vestibulaire (Figure 1.6) est un ensemble de canaux interconnectés qui utilisent des mécanorécepteurs appelés cellules ciliées pour opérer la transduction des déplacements du corps et de la tête en influx nerveux. Il y a en tout trois canaux semi-circulaires : un dans le plan horizontal, un dans le plan antérieur et un dans le plan postérieur. A la base de ces trois canaux, on retrouve deux organes otolithiques, l'utricule et le saccule.

Les organes otolithiques sont spécialisés dans la réponse aux accélérations linéaires de la tête ainsi qu'à la position statique par rapport à l'axe de la pesanteur. Ils détectent les déplacements et accélérations linéaires induits par les mouvements de translation ou

d'inclinaison de la tête (Shepard & Telian, 1992). Les canaux semi-circulaires sont eux impliqués dans la détection des accélérations angulaires qui accompagnent les rotations de la tête.

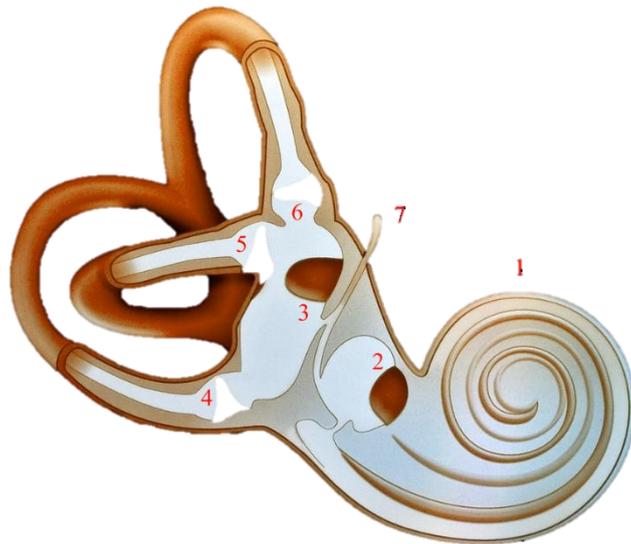


Figure 1.6 Schéma de l'oreille interne : 1 Cochlée ; 2 Saccule ; 3 Utricule ; 4 Ampoule du canal postérieur ; 5 Ampoule du canal externe ; 6 Ampoule du canal supérieur ; 7 Canal endolymphatique

(Source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oreille_Interne.png)

Les cellules ciliées se trouvent dans les organes otolithiques et dans les ampoules situées à la base des canaux semi-circulaires. Ce sont des mécanorécepteurs sensibles aux mouvements de la tête. Les cellules ciliées ondulent, se courbent, se penchent sous l'action des accélérations et des variations de position de la tête.

Le système vestibulaire a une limite très importante : il ne fait pas la différence entre immobilité et déplacement à vitesse constante (il détecte seulement les accélérations). Dans ces circonstances, il a besoin d'être complété par la vision périphérique pour indiquer si oui ou non nous sommes en mouvement.

1.2.2 Pour la conduite

Le système vestibulaire agit comme une centrale inertielle ou encore un accéléromètre tridimensionnel, et son rôle dans la conduite est de permettre la perception des accélérations du véhicule (selon les différents degrés de liberté de celui-ci). Des travaux ont montré que les personnes souffrant de troubles de l'oreille interne ou dont le système

vestibulaire est perturbé (temporairement) ont beaucoup de difficultés à conduire, que ce soit dans une situation de conduite réelle ou simulée, et ce à la fois d'un point de vue de leur ressenti (désorientation, nausée) et d'un point de vue objectif (contrôle de la direction de leur véhicule) (Clarke et al., 1996; Page & Gresty, 1985).

1.3 LE SENS HAPTIQUE

La perception haptique regroupe la perception tactile (qui passe par le sens du toucher) et la proprioception (qui passe par le système sensoriel proprioceptif) (Fuchs et al., 2006).

1.3.1 Le toucher

Le système tactile est un sous-système du système somesthésique qui prend en charge la sensibilité somatique (c'est-à-dire la sensibilité « du corps ») et possède de nombreux récepteurs disséminés dans l'ensemble du corps, à la fois dans la peau, les muscles, les tendons et les structures articulaires.

Les sensations de toucher, de pression et de vibration impliquent des mécanorécepteurs tactiles, c'est-à-dire sensibles aux stimuli mécaniques (les mécanorécepteurs sont déformés par ces stimuli) que l'on retrouve dans la peau. Les mécanorécepteurs tactiles ont des fonctions sensorielles primordiales : ils nous permettent d'identifier les caractéristiques des objets que nous manipulons (telles que leur forme, leur texture et leur taille).

Les différents types de mécanorécepteurs (Figure 1.7) que l'on retrouve dans la peau sont les suivants (Halata & Baumann, 2008; Hale & Stanney, 2004) :

1. les disques de Merkel, que l'on retrouve au niveau de l'épiderme, soit la partie la plus superficielle de la peau. Ils sont sensibles aux très légères pressions (pour la discrimination des textures) et représentent 25% des récepteurs de la main ;
2. les corpuscules de Meissner, dans la couche supérieure du derme, qui sont sensibles au toucher léger (par exemple frottement des doigts) et représentent 40% des récepteurs de la main ;
3. les corpuscules de Pacini, localisés dans la partie profonde de la peau – l'hypoderme, sensible au toucher profond (par exemple pressions profondes, vibrations) et représentent 10 à 15% des récepteurs de la main ;
4. les corpuscules de Ruffini, également situés dans l'hypoderme et cette fois sensibles aux étirements de la peau par les mouvements des doigts et de la main.

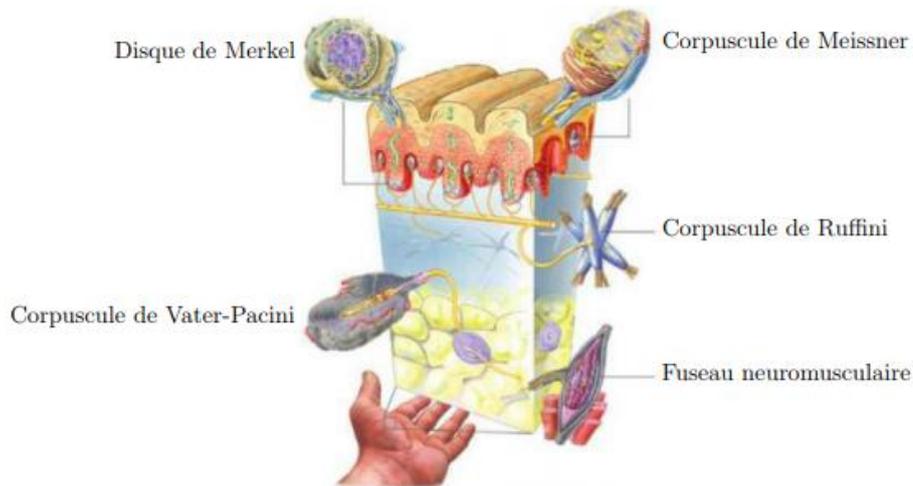


Figure 1.7 Localisation des mécanorécepteurs sur une vue en coupe de la peau (Halata & Baumann, 2008)

Les caractéristiques de ces mécanorécepteurs sont synthétisées par le Tableau 1.2.

Tableau 1.2 Synthèse des mécanorécepteurs tactiles

Récepteur	Stimuli détectés	Durée de perception	Fréquences perçues
Disque de Merkel	Pression lente, légère, petits détails	Égale à celle du stimulus	0.3 à 3 Hz
Corpuscule de Meissner	Pression rapide, tremblement, frottement	Transitoire	3 à 40 Hz
Corpuscule de Pacini	Vibration rapide	Transitoire	10 à 500 Hz
Corpuscule de Ruffini	Étirement	Égale à celle du stimulus	15 à 400 Hz

1.3.2 La proprioception

Les positions de nos membres sont détectées par des mécanorécepteurs que l'on retrouve au sein même de nos membres (muscles et tendons) et de nos articulations, les mécanorécepteurs proprioceptifs (ou propriocepteurs).

Le système musculo-articulaire a une activité perceptive à part entière grâce à trois types de mécanorécepteurs (Reymond, 2000) :

1. les fuseaux neuromusculaires, au sein des muscles et qui renseignent sur la longueur et les variations de longueur des muscles ;
2. les organes tendineux de Golgi, dans les tendons et sensibles aux variations de tension musculaire ;
3. et les récepteurs articulaires, entre les os d'une articulation et sensibles aux mouvements articulaires (flexion, extension, rotation).

Berthoz défend dans ses travaux (Le sens du mouvement) la proprioception comme étant le sixième sens humain (Berthoz, 1997). La proprioception est la perception du corps et des membres, de leur position et de leur mouvement sans l'aide de la vision. La proprioception se divise en deux modalités : statique, qui renseigne sur la position des membres les uns par rapport aux autres, et dynamique, qui renseigne sur les déplacements des membres dans l'espace.

Le sens proprioceptif implique par complémentarité de nombreux récepteurs sensoriels, dont les propriocepteurs mentionnés plus haut. Le labyrinthe vestibulaire et les mécanorécepteurs cutanés sont également impliqués dans la proprioception.

Le sens proprioceptif renvoie à plusieurs sous-catégories de sens :

1. le sens de la position ;
2. le sens du mouvement, pour lequel le poids accordé aux différents récepteurs mobilisés varie en fonction des articulations et du contexte du mouvement ;
3. le sens de l'équilibre lors de mouvements volontaires et en réponse à des perturbations non anticipées ;
4. le sens de la tension ou sens de la force ;
5. le sens de l'effort.

1.3.3 Pour la conduite

Les situations de conduite regorgent de stimuli haptiques à traiter et interpréter. Parmi ceux-ci, de nombreux sont issus de l'interaction avec le véhicule : le volant et les pédales, pour la conduite automobile, le guidon, les pédales, l'accélérateur, les poignées de frein et d'embrayage, pour la conduite de moto. Un conducteur de moto qui actionne l'accélérateur reçoit des informations tactiles sur le contact avec la poignée et des informations proprioceptives sur le mouvement de sa main et son poignet.

Un conducteur de voiture peut s'appuyer au niveau de son volant sur un retour d'effort résultant de la force de contact pneus/route et de la cinématique du système de direction (Mohellebi et al., 2009) pour déduire des informations sur la dynamique de son véhicule, par exemple pour estimer son accélération latérale (Essma, 2000). L'effort qu'il ressent en retour est, à vitesse et adhérence données, proportionnel à l'angle volant (Toffin et al., 2003, 2007). Un conducteur de moto peut également déduire un grand nombre d'informations des stimuli haptiques au niveau du guidon de son véhicule. La dynamique d'une moto est d'ailleurs plus complexe que celle d'une voiture et la tâche de guidage du véhicule très différente. De ce fait, une situation de conduite moto est encore plus riche en stimuli haptiques (qu'ils soient tactiles ou proprioceptifs) qu'une situation de conduite de voiture. Cela se conçoit bien : le conducteur est en contact direct avec sa moto et son mouvement propre est lié de manière plus étroite aux mouvements de sa moto (avec des degrés de liberté différents, notamment des rotations).

Pour les simulateurs de conduite automobile, des travaux ont montré la pertinence d'intégrer un retour d'effort au niveau du volant. Liu et Chang qui ont par exemple mis en évidence une variabilité de l'angle de volant (en conséquence de l'action du conducteur) moindre en présence d'un retour d'effort, notamment pour le suivi d'une trajectoire en ligne droite (Liu & Chang, 1995). Concernant les simulateurs de conduite de moto, nous reviendrons à la question du retour haptique au niveau du guidon dans la suite.

1.4 L'INTEGRATION MULTISENSORIELLE

Tous les sens fonctionnent simultanément. À la notion d'intégration multisensorielle, on peut rattacher quatre concepts distincts qui dépendent du contexte moteur dans lequel on se trouve :

1. la redondance sensorielle, quand deux sens différents donnent la même information, ce qui permet le maintien d'une perception fonctionnelle même si l'un des deux sens est lésé ;
2. la complémentarité sensorielle, quand plusieurs sens interviennent simultanément pour permettre d'apprécier la situation perceptive dans sa globalité, dans le cas où un sens isolé ne suffit pas. La complémentarité sensorielle est utile par exemple pour la marche ;
3. le conflit sensoriel. Généralement, les informations sensorielles sont complémentaires et redondantes mais parfois, elles sont conflictuelles : un canal sensoriel communique une information, alors qu'un autre communique une information contradictoire (par exemple un conflit sensoriel visuo-vestibulaire) ;

4. et la pondération sensorielle : le poids associé à chaque modalité sensorielle dépend du contexte dans lequel on se trouve. Autrement dit, en fonction du contexte, on utilise davantage les informations d'un canal sensoriel plutôt qu'un autre ; on fait davantage confiance à un système plutôt qu'un autre.

L'intégration multisensorielle dépend bien sûr de chaque individu.

La conduite d'un véhicule automobile mobilise, pour le conducteur, plusieurs retours sensoriels : visuel, vestibulaire, haptique et auditif. En effet, ces retours informationnels indiquent au conducteur l'état (position, vitesse, accélération) actuel de son véhicule, dont la connaissance est indispensable pour guider ledit véhicule vers un état désiré. C'est l'intégration multisensorielle des informations fournies par les différents sens du corps humain qui donne conscience au conducteur du mouvement de son corps par rapport à lui-même et par rapport à son environnement.

1.5 LE MODELE INTERNE

L'apprentissage moteur, qui se fait de manière permanente au fil de la vie d'un être humain, passe par la pratique. L'expérience passée et la répétition de tâches de contrôle moteur permettent l'amélioration de la précision des mouvements volontaires, qu'ils soient simples ou complexes (saisir un objet, marcher, conduire un véhicule...). La capacité à réagir et à anticiper se construit au fur et à mesure de l'expérience de vie (Adams, 1971). Cet apprentissage se fait par phases :

1. phase cognitive : « Qu'est-ce qu'il faut faire ? ». C'est la phase dans laquelle se situe un apprenant novice. Une activité cognitive considérable est nécessaire pour que l'apprenant puisse déterminer les stratégies appropriées pour refléter adéquatement le but recherché. Les bonnes stratégies sont retenues et les stratégies inefficaces sont écartées. La performance est grandement améliorée en peu de temps ;
2. phase associative : l'apprenant a déterminé la manière la plus efficace d'effectuer la tâche et commence à apporter des ajustements subtils à sa performance. Les améliorations sont plus graduelles et les mouvements deviennent plus cohérents ;
3. phase autonome : au bout de plusieurs mois, voire d'années selon la tâche et l'apprenant, l'exécutant peut désormais accomplir "automatiquement" la tâche sans avoir à prêter attention à son exécution (Schmidt & Lee, 2011).

L'apprentissage moteur construit le modèle interne (principe issu de la théorie du contrôle : (Francis & Wonham, 1976)).

Une autre façon d'aborder le modèle interne est que, pour organiser un mouvement et contrôler les nombreux degrés de liberté impliqués dans l'action, le cerveau a besoin de calculer et de sélectionner une commande motrice (une entrée) pour obtenir un retour sensoriel désiré (une sortie) (Schmidt & Lee, 2011; Wolpert & Kawato, 1998). Cette sélection dépend de nombreuses variables internes et externes, telles que l'état actuel du ou des membres, l'orientation du corps et les propriétés des éléments de l'environnement avec lesquels le corps va interagir. Étant donné le grand nombre de combinaisons possibles de ces variables, le système de contrôle moteur doit être capable de fournir une commande appropriée pour tout contexte donné. Un tel processus implique nécessairement une approche modulaire, avec plusieurs contrôleurs adaptés chacun à un ou un petit ensemble de contextes. Sur la base d'une estimation du contexte actuel, un contrôleur est choisi pour générer la commande motrice appropriée pour une situation donnée.

Ce système modulaire peut être utilisé pour décrire à la fois le contrôle moteur et l'apprentissage moteur et nécessite des modèles internes adaptables, directs et inverses. Les modèles directs décrivent la relation directe ou causale entre les entrées du système, en prédisant le retour sensoriel qui se produira : si telle commande motrice est sélectionnée et envoyée au système moteur alors tel retour sensoriel sera perçu en retour. Les modèles inverses font ... l'inverse : dans ce contexte, pour arriver à tel retour sensoriel, il faut envoyer telle commande motrice au système moteur. Au cours de l'apprentissage moteur, les modèles direct et inverse sont appariés et étroitement couplés.

C'est la théorie du modèle interne, soutenue notamment par Berthoz (Berthoz, 1997, 2009), et qui fait l'objet des travaux de nombreux chercheurs aujourd'hui (Kawato, 1999; McNamee & Wolpert, 2019; Pierella et al., 2019; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994; Todorov & Jordan, 2002; Wolpert et al., 1995, 2011). Pour percevoir, et pour agir, le cerveau simule en permanence le corps et le monde dans un grand nombre de scénarios parallèles. Dans ses travaux, Berthoz défend notamment l'idée que « la perception est action simulée » (Berthoz, 1997, p. 15) : le modèle interne est responsable à 80% de la perception. Pour le reste, les retours sensoriels donnent l'information sur la position initiale, un retour d'erreur pendant le mouvement, et l'erreur statique à la fin du mouvement, qui indique le succès de l'entreprise et sert notamment à régler le modèle interne.

Du fait de l'existence du modèle interne, l'être humain anticipe l'évolution de son contexte et s'attend à percevoir des stimuli. Si les stimuli reçus sont incohérents avec ses attentes, l'individu est perturbé.

1.6 CONCLUSION PARTIELLE

Comprendre le fonctionnement des systèmes sensoriels humains est essentiel dans le cadre de nos travaux qui portent sur la conception d'un simulateur de conduite moto. En effet, au centre du simulateur se trouve un être humain, le conducteur, qui, par ses actions, initie le déplacement du véhicule virtuel et les mouvements de la plate-forme mobile, et qui est le récepteur des stimuli sensoriels que le simulateur de conduite est capable de produire. Dans ce chapitre, nous avons donc présenté le fonctionnement de la perception humaine, et en particulier des systèmes sensoriels humains qui sont mobilisés lors une tâche de conduite : la vision, le système vestibulaire et le sens haptique. Nous avons également abordé des processus centraux pour la perception : d'une part, l'intégration multisensorielle qui permet à partir des différents retours sensoriels d'avoir une interprétation unique de l'environnement et du corps, et, d'autre part, le modèle interne qui permet d'organiser un mouvement, de contrôler les nombreux de liberté impliqués dans l'action, et d'anticiper les évolutions. Il s'agit d'un contexte à comprendre impérativement pour instrumenter un simulateur de conduite, qui a pour but d'étudier le comportement de l'humain dans la boucle (le conducteur).

Dans la section suivante, nous présentons un état de l'art des simulateurs de conduite existants, en nous concentrant principalement sur les systèmes de restitution sensorielle mis en place. On sait aujourd'hui que la simulation de conduite de véhicules terrestres est plus difficile à mettre en œuvre sans rendre malade les conducteurs que la simulation de vol par exemple. D'une part, les véhicules terrestres sont en contact avec le sol et ce contact produit des accélérations longitudinales et latérales, qui sont difficiles voire impossibles à reproduire en simulation. D'autre part, la proximité avec le sol implique un défilement visuel important, ce qui n'est par exemple pas le cas pour l'aviation. En ce qui concerne la simulation de vol, le cas le plus proche d'un point de vue visuel est l'hélicoptère, qui vole à basse altitude (par rapport à un avion), et pour lequel l'occurrence du « mal du simulateur » pour les participants est fréquente.

2 CONTEXTE, VERSANT N°2 : LES SIMULATEURS DE CONDUITE

2.1 CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA SIMULATION « HUMAIN-DANS-LA-BOUCLE »

Les simulateurs avec un être humain dans la boucle sont apparus durant l'ère de l'aviation (à la période de la Première Guerre Mondiale) pour la formation des pilotes. Le simulateur de vol « Tonneau Antoinette », en photo en Figure 2.1, en est un exemple notable. Il était utilisé pour l'entraînement au sol des pilotes de l'Armée de l'air française. Dans ce premier simulateur de vol, les pilotes en formation étaient assis dans un demi-tonneau monté sur un joint universel, avec des commandes de vol, des poulies et des ailes tronquées. Les pilotes débutants pratiquaient les manœuvres de base et les instructeurs déplaçaient le simulateur de vol en fonction de ce qu'ils avaient appris grâce à leur expérience sur le terrain. Il est clair que dans cet exemple, il n'était pas nécessaire de modéliser la physique exacte, mais que les pilotes en formation rencontrent les tendances comportementales les plus importantes. Les instructeurs étaient des pilotes expérimentés et pouvaient donc reproduire ces tendances. La mise en œuvre de modèles de vol grâce à des calculateurs est arrivée plus tard.



Figure 2.1 Entraînement au sol des pilotes de l'Armée de l'air française grâce au simulateur de vol « Tonneau Antoinette » (1910)

À notre époque, la simulation « humain-dans-la-boucle » joue un rôle de plus en plus important dans divers domaines d'application. Pour prendre des exemples plus ou moins

éloignés de nos domaines d'expertise, la psychothérapie moderne permet aux patients atteints de troubles phobiques d'entrer en contact avec les situations ou objets qu'ils redoutent dans un environnement contrôlé et sûr (Eichenberg, 2007; Krijn et al., 2004; Mühlberger & Pauli, 2011) et les médecins d'aujourd'hui et s'entraînent à des techniques chirurgicales complexes en utilisant des environnements virtuels (Kusumoto et al., 2006; Lin et al., 2014).

Des progrès comparables et tout aussi remarquables dans l'utilisation des simulateurs ont été observés dans le domaine des transports au cours des trois dernières décennies. La simulation de conduite terrestre est un domaine dans lequel on trouve des simulateurs avec un être humain dans la boucle. L'objectif, dans ce cas, est de donner à un conducteur l'illusion de conduire un véhicule terrestre (par exemple une voiture, une moto, ou un poids lourd). La simulation de conduite est principalement utilisée dans les trois domaines suivants, avec des objectifs et des moyens différents :

1. la recherche et le développement dans l'industrie automobile ;
2. les études et les recherches sur les comportements de conduite ;
3. et la formation ou le réentraînement.

Les simulateurs de conduite se composent des deux parties suivantes : (1) le véhicule simulé ; et (2) l'environnement de simulation, c'est-à-dire le réseau routier et les différents acteurs de la situation. Le conducteur dans la boucle opère le véhicule virtuel composé d'une cabine de véhicule et d'un modèle de véhicule. Le terme « simulateur de conduite » couvre des configurations assez hétérogènes, avec des degrés de complexité respectifs de la cabine et du modèle de véhicule pouvant varier. Il existe des simulateurs de conduite dans des versions très simples – utilisant par exemple une manette de jeu en forme de volant et un écran d'ordinateur, mais aussi dans des versions beaucoup plus complexes et parfois extrêmement coûteuses, comprenant comme cabine un véhicule entièrement équipé monté sur une plate-forme mobile.

Une première catégorie de simulateurs de conduite (de moto) regroupe les simulateurs conçus principalement pour la formation des conducteurs, comme les simulateurs EF Scoot et EF Bike d'ECA Faros ou encore le simulateur Riding Trainer d'Honda (en photos Figure 2.2). Ces simulateurs de conduite utilisent en général des interfaces réalistes pour capturer l'action du conducteur, comme un guidon entièrement fonctionnel, mais implémentent un nombre très limité d'interfaces. Ils implémentent la plupart du temps des modèles de moto très simples et permettent seulement d'explorer un nombre restreint de scénarios prédéfinis.



(a)



(b)

Figure 2.2 (a) Simulateur EF Bike d'ECA Faros ; (b) simulateur Riding Trainer d'Honda
(Sources : <https://www.ecagroup.com/en/solutions/ef-bike-motorcycle-simulator> et Honda Motor Co)

Nous nous intéressons en particulier au cas des simulateurs de conduite qui incluent une cabine physique (tout ou partie d'un véhicule réel). On comprend bien que dans ce cas la cabine du véhicule peut être fixe ou mobile, avec différents mouvements possibles et un nombre variable de capteurs et d'actionneurs. Un simulateur avec une cabine de véhicule montée sur une plate-forme mobile est appelé simulateur dynamique.

2.2 LES SIMULATEURS DE CONDUITE AUTOMOBILE

Pour parvenir à créer une illusion de l'expérience de conduite, différents systèmes sont combinés. Le diagramme de la Figure 2.3 montre non seulement l'interdépendance entre chaque sous-système, mais aussi comment le conducteur et le modèle du véhicule sont au centre du processus.

Les concepteurs de simulateur de conduite automobile concentrent souvent soit sur le modèle de véhicule, soit sur la partie fléchée en vert, à savoir la restitution de mouvement, comme en témoigne l'étude des évolutions des simulateurs de conduite. L'idée centrale pour la restitution sensorielle dans un simulateur de conduite est que l'exploitation de la redondance et de la complémentarité sensorielles permet de donner l'illusion au conducteur d'être soumis à une situation de conduite pourtant inexistante (Kemeny, 2000; Reymond et al., 1999; Reymond & Kemeny, 2000; Siegler et al., 2001).

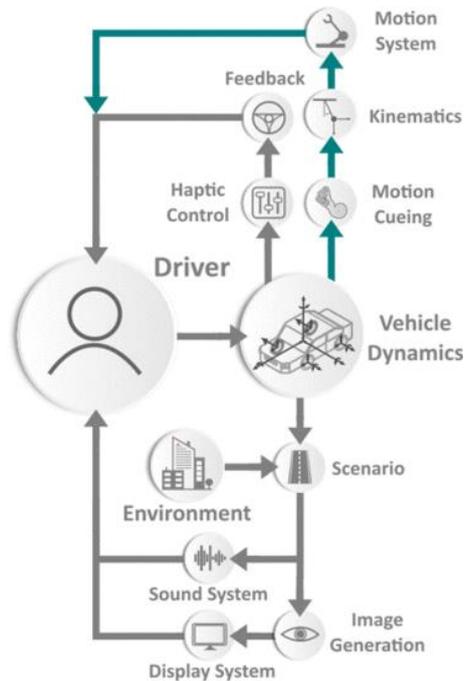


Figure 2.3 Diagramme de principe d'un simulateur de conduite (Bruck et al., 2021)

Dans les années 1960, à l'époque de l'apparition des premiers simulateurs de conduite automobile, les possibilités pour la restitution visuelle étaient assez limitées et les simulateurs étaient donc, de fait, équipés, en face du conducteur dans la cabine, d'écrans qui affichaient une scène visuelle qui serait considérée « pauvre » aujourd'hui : une scène préexistante déroulant à vitesse variable en fonction des actions du conducteur (Denton, 1966). Le contrôle latéral de la direction n'était pas possible. Ces aspects de restitution visuelle et d'interactivité ont pu évoluer à partir des années 1980 avec l'évolution de l'informatique – avec les calculs temps réel - et des graphiques - avec la génération d'images de synthèse.

En parallèle, la restitution de mouvement est ensuite devenue un sujet à part entière. Les simulateurs de conduite automobile dynamiques sont devenus de plus en plus présents, en s'inspirant des évolutions dans la simulation de vol, qui comme nous l'avons mentionné est plus ancienne et en récupérant les plateformes mobiles développées pour (hydrauliques, puis électromécaniques). Dans un premier temps, les simulateurs dynamiques ont permis d'étudier le confort et la tenue de route des véhicules (Kohr, 1961), par exemple avec le simulateur de General Motors simulait les mouvements de la cabine sans retour visuel (voir Figure 2.4).

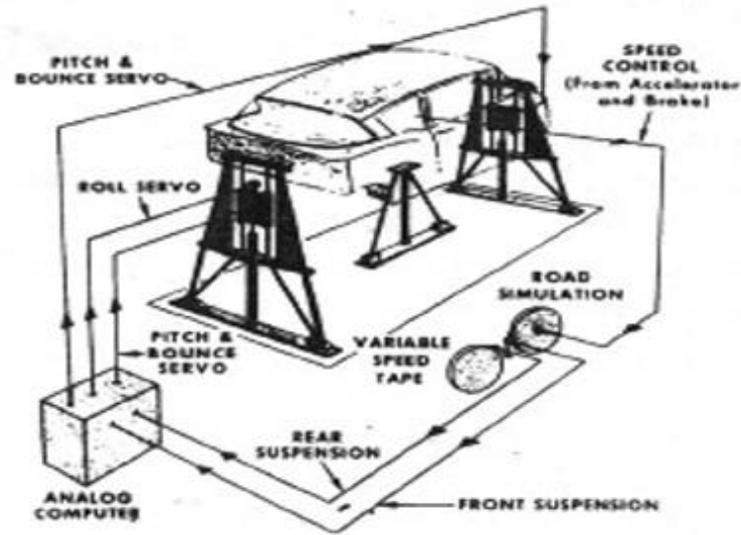


Figure 2.4 Simulateur de tenue de route et de confort General Motors (Kohr, 1961)

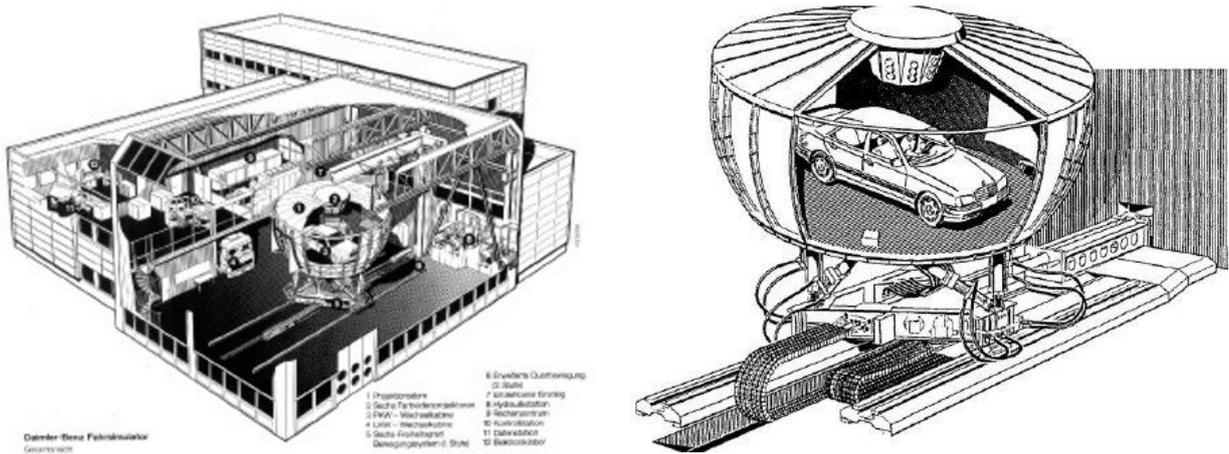


Figure 2.5 Simulateur Daimler-Benz (Drosdol & Panik, 1985; Käding & Hoffmeyer, 1995)

Les possibilités offertes par la restitution visuelle et la restitution de mouvement ont ensuite été associées, avec pour objectif de créer des simulateurs de plus en plus « immersifs » (objectif qui est toujours principal aujourd’hui), notamment sous l’impulsion du constructeur automobile Daimler-Benz (Drosdol & Panik, 1985). Daimler-Benz a présenté un simulateur très ambitieux en 1985 (voir Figure 2.5), qui a ensuite servi pour de nombreuses expérimentations (Greznikowski & Schill, 2000). Ce simulateur était composé d’un écran circulaire avec six projecteurs, monté sur une plateforme mobile à 6 degrés de liberté (3 translations et 3 rotations), elle-même montée sur un chariot mobile suivant l’axe latéral, lequel servait à restituer les accélérations latérales pour des manœuvres de changement de voie (Drosdol et al., 1986; Drosdol & Panik, 1985). C’est

sur ce modèle que sont construits les simulateurs « de pointe » des années 2020 de BMW et Renault (voir Figure 2.8).

D'autres constructeurs ont suivi la marche montrée par Daimler-Benz à partir des années 1990, par exemple Ford, Chrysler et Renault (voir l'état de l'art de Weir et Clark dans la deuxième moitié des années 1990 (Weir & Clark, 1995)). En parallèle, les simulateurs de conduite étaient aussi déjà un intérêt pour la recherche publique, notamment pour des études sur le comportement de conduite. Des exemples sont les simulateurs du centre VTI en Suède, à l'Institut national de recherche sur les routes et les transports, dont le premier exemple date de 1984 (Nordmark et al., 1984). Ce simulateur, représenté en Figure 2.6, consistait en une cabine reproduisant l'avant d'un véhicule, montée sur une plate-forme à deux axes de rotation (roulis et tangage), avec une grande amplitude angulaire de $\pm 22^\circ$. L'ensemble était positionné sur des rails de 6m suivant l'axe latéral. Il implémentait un écran hémicylindrique avec un champ de vision de 120° .

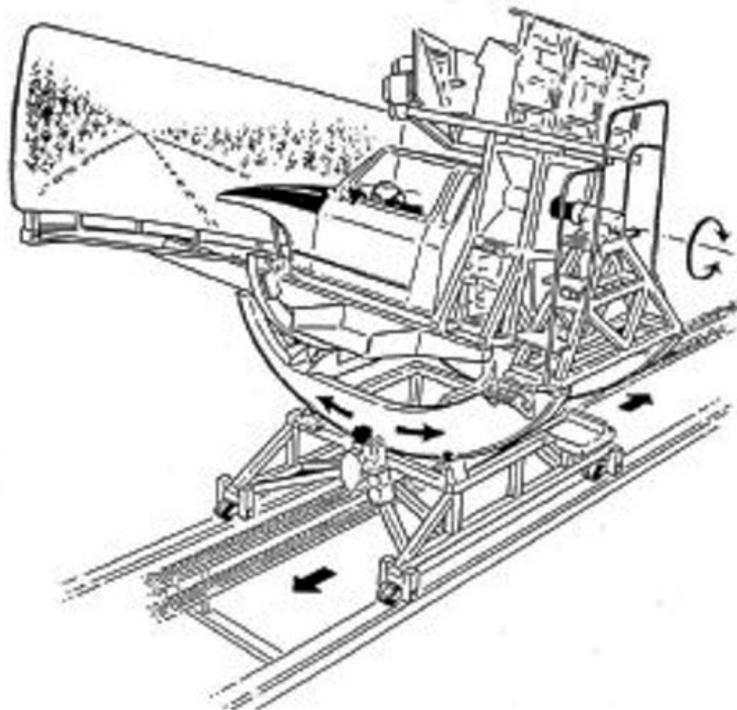


Figure 2.6 Simulateur VTI (Nordmark et al., 1984)

Aux Etats-Unis, on peut prendre l'exemple du NADS (voir Figure 2.7) qui a été mis en service en 2001 (longtemps le plus grand simulateur au monde, mais aujourd'hui égalé ou surpassé). Le NADS a 9 degrés de liberté (une plate-forme 6 axes et deux chariots), sur

de grandes amplitudes de mouvement (Garrott, 1994). Un véhicule entier peut être placé à l'intérieur. La scène visuelle est projetée à 360° dans le dôme.



(a)



(b)

Figure 2.7 Simulateurs plus récents (après l'an 2000) : (a) Simulateur NADS ; (b) Simulateur Toyota (Sources : <https://nads.uiowa.edu/nads-1> et <https://global.toyota/en/download/14221294/>)

Sur le même modèle, avec une tendance à rechercher des amplitudes de mouvement de plus en plus grandes, on trouve les simulateurs Toyota (voir Figure 2.7.b), BMW et Renault (voir Figure 2.8).



(a)



(b)

Figure 2.8 Simulateurs « des années 2020 » : (a) BMW Sapphire Space ; (b) Renault ROADS (Sources : <https://www.press.bmwgroup.com/france/article/detail/T0342452FR/iaa-mobility-2021-%E2%80%93-workshop-sur-l-innovation-bmw-group-2021> et <https://www.project-syntropy.de/en/portfolio-item/renault-roads-driving-simulator-360-visual-display-system/>)

Cet historique des simulateurs de conduite automobile permet d'illustrer les choix réalisés par leurs concepteurs produire des sensations les plus proches possibles de la réalité pour le conducteur.

D'une part, les concepteurs ont fait le choix d'utiliser pour la restitution visuelle exclusivement des écrans sur lesquels est projetée la scène visuelle, et qui sont souvent faits sur mesure pour couvrir des champs de vision horizontaux et verticaux les plus larges possibles (par exemple avec un dôme).

D'autre part, beaucoup d'efforts ont été faits sur les systèmes de restitution de mouvement, avec une recherche de la reproduction à l'échelle 1 des phénomènes physiques. Les simulateurs les plus grands sont capables de reproduire à l'échelle 1 une manœuvre de changement d'une voie. Cependant, ces systèmes de restitution de mouvement sont encore limités de plusieurs manières : pour la dynamique longitudinale où la longueur du mouvement ne permet pas l'échelle 1 dans tous les cas (un freinage à 130 km/h demande plus de 50 m de distance), mais surtout du fait qu'il s'agit de systèmes lourds, coûteux et énergivores à mettre en place. Ils consomment beaucoup d'énergie pour exploiter toute l'amplitude de mouvement disponible et nécessitent de mettre en place des stratégies pour compenser les limitations des accélérations latérales et longitudinales qui peuvent être produites. L'utilisation de mouvements de rotation pour compenser un manque de dynamique des accélérations linéaires produites (une stratégie appelée *tilt coordination*) est par exemple couramment utilisée. Cette dernière pose problème du point de vue de la perception humaine : une accélération angulaire n'est en effet pas perçue de la même manière qu'une accélération longitudinale ou latérale.

Enfin, un dernier verrou qui reste à lever, même pour les simulateurs haut de gamme, est la simulation d'un comportement « réaliste » des agents qui peuplent la scène virtuelle (c'est-à-dire des autres usagers de la route, y compris potentiellement des usagers vulnérables).

2.3 LES SIMULATEURS DE CONDUITE MOTO

Comme nous l'avons vu, les constructeurs automobiles utilisent actuellement des simulateurs haut de gamme, capables d'approcher l'échelle 1 pour les manœuvres de changement de voie (c'est-à-dire pour la dynamique latérale). Cependant, ils sont toujours limités par la taille des simulateurs pour la question de la dynamique longitudinale. La question est beaucoup plus complexe pour les motos. Un problème critique (entre autres) pour la conception des simulateurs de motos est l'impossibilité de rendre les forces centripètes pour les virages à droite et à gauche. De plus, les moyens économiques disponibles sont moindres, probablement du fait d'un marché beaucoup moins important pour les deux-roues que pour les automobiles.

L'échelle 1 étant impossible à réaliser pour les simulateurs de moto, la question devient comment trouver, à budget limité et pour un spectre d'usages limité lui aussi, des choix de conception et de réalisation qui permettent de créer la meilleure illusion de conduite possible pour le conducteur. Les stratégies de conception employées sont donc très différentes de celles des constructeurs de simulateurs de conduite automobile, surtout haut de gamme.

2.3.1 Les simulateurs de moto Honda

Le premier simulateur de conduite de deux-roues dont nous avons trouvé la trace dans la littérature est le simulateur de moto Honda (en photo en Figure 2.9), développé à partir de 1988 et présenté en 1991 (Chiyoda et al., 2002; Miyamaru et al., 2002). Ce premier prototype était constitué d'un châssis de moto, monté sur une plate-forme mobile à balancier équipée de sept actionneurs. Sa plate-forme permettait un mouvement selon 5 Degrés De liberté (abrégé DDLs) : translation latérale et 3 rotations : roulis, tangage, lacet, plus l'angle de guidon. Il utilisait un écran de projection pour la restitution visuelle et un système sonore stéréo pour la restitution auditive.

Le modèle de véhicule implémenté était un modèle de moto linéaire à 4 DDLs (translation latérale, roulis, lacet et direction), le modèle de Sharp (Miyamaru et al., 2002; Sharp, 1971). Cependant, ce prototype n'était pas contrôlable à basse vitesse, ni pour une manœuvre de prise de virage. En particulier, la prise de virage posait un problème majeur car les conducteurs avaient tendance à conduire le simulateur comme une voiture, c'est-à-dire à tourner le guidon dans la direction du virage, alors qu'en conduite réelle ils auraient tendance à utiliser la méthode de contre-braquage.

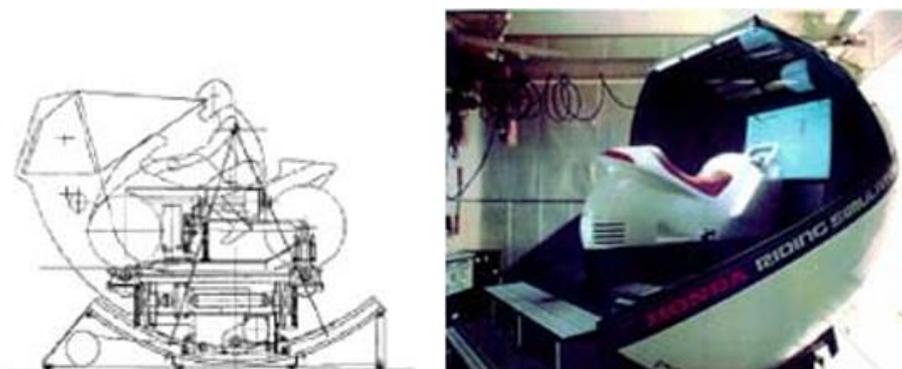


Figure 2.9 Prototype n°1 du simulateur de moto Honda
(Source : <http://world.honda.com/motorcycle-technology/sim/p3.html>)

A partir du mois de septembre 1996, l'utilisation d'un simulateur de conduite moto est devenue obligatoire pour les moto-écoles japonaises et a été intégrée dans leur curriculum de formation. Le but était de sensibiliser les apprentis conducteurs aux situations dangereuses potentielles auxquelles ils pourraient être confrontés sur la route, et leur apprendre à gérer ces situations à risque.

En réponse à ce besoin, Honda a mis au point un deuxième prototype de simulateur moto (en photo en Figure 2.10). Cette fois-ci le curseur était positionné différemment pour sa conception : un simulateur « manœuvrable », (ce qui correspond à ce que nous appelons dans ce manuscrit « contrôlable »), pour permettre une tâche de conduite « facile » dans le cadre d'une formation à la sécurité routière, plutôt qu'un simulateur complexe essayant de reproduire les caractéristiques dynamiques réelles d'une moto (Miyamaru et al., 2002). Un critère était notamment que le simulateur soit capable de tourner dans la direction désirée.

Ce deuxième simulateur moto était constitué d'un châssis de moto, avec des actionneurs permettant un mouvement selon 3 DDLs : 2 rotations : roulis et tangage, plus l'angle de guidon (Katayama et al., 1996; Yamasaki et al., 1996, 1998).

Le modèle de véhicule implémenté était construit à partir d'une reformulation du modèle de Sharp qui s'appuyait sur une étude des actions de contrôle effectuées par les conducteurs en conduite réelle. Ce modèle fonctionnel (de moto + de conducteur) prévoyait une action sur le guidon prioritaire à basse vitesse, une action sur le roulis prioritaire à haute vitesse, et une combinaison des deux à vitesse moyenne (Miyamaru et al., 2002).



Figure 2.10 Prototype n°2 du simulateur de moto Honda
(Source : <http://world.honda.com/motorcycle-technology/sim/p3.html>)

Dans ce prototype, une inclinaison de l'horizon visuel dans la direction opposée à celle du simulateur et un freinage du véhicule virtuel étaient implémentés pour enrichir la simulation de l'inclinaison en roulis (Yamasaki et al., 1996).

Enfin, et pour la première fois en 2002, Honda a commercialisé une nouvelle version de son simulateur de conduite (en photo en Figure 2.11), avec une plate-forme mobile de Gough-Stewart à 6 DDLs (Chiyoda et al., 2000). Ce type de plate-forme est très souvent utilisé pour la construction d'un simulateur de conduite car elle permet de sélectionner les centres de rotation en roulis, tangage et lacet, ce qui est crucial pour ce type de systèmes (comme suggéré par les travaux de (Yamasaki et al., 1998)), étant donné que la perception du mouvement propre par le conducteur peut dépendre de ces centres de rotation. D'un point de vue système, ce type de plate-forme peut être pilotée finement et permet donc de minimiser les erreurs de mesure et de positionnement. Ce simulateur utilise un casque de réalité virtuelle (*Head-Mounted Display*, abrégé *HMD*) pour la visualisation.

Le modèle de moto implémenté est le même que pour le deuxième prototype, le modèle de Katayama qui combine le modèle dynamique de Sharp avec un modèle des actions du conducteur (Chiyoda et al., 2000; Katayama et al., 1996). La commande de la plate-forme mobile passe également par un algorithme de *washout*.

Ce simulateur utilise un HMD pour la restitution visuelle et un système audio permettant d'adapter la source d'émission de la restitution sonore selon la position de la tête du conducteur.

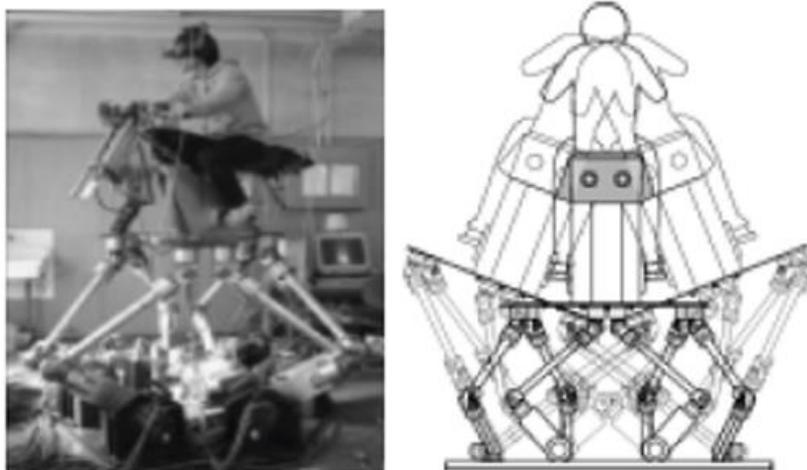


Figure 2.11 Simulateur de moto Honda/Université de Tokyo (Chiyoda et al., 2000)

Depuis les premiers prototypes de simulateur de moto présentés par Honda, l'intérêt grandissant pour les simulateurs de conduite moto dans les domaines de la recherche et du développement peut être attribué à la combinaison de différents facteurs : la popularité croissante des deux-roues motorisés, une surreprésentation des conducteurs de ces véhicules dans l'accidentalité routière, et l'expérience positive de l'utilisation des simulateurs de conduite dans l'industrie automobile.

2.3.2 Et ceux d'après

Peu de simulateurs moto ont été développés à ce jour (en photo de la Figure 2.12 à la Figure 2.18). Le Tableau 2.1 en donne une vue synthétique, avec le but de conception, le nombre de degrés de liberté de la restitution de mouvement et le modèle de véhicule utilisé (si l'information est disponible). La plupart des simulateurs sont capables de reproduire un mouvement selon trois DDL ou plus. En général, les DDL privilégiés sont les rotations et celui qui est privilégié parmi les rotations est le mouvement de rotation.

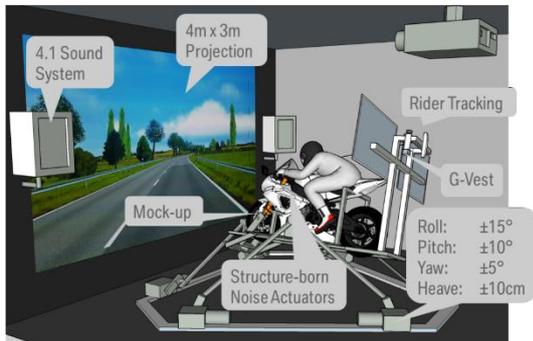


Figure 2.12 Simulateur de moto BMW Motorrad (Guth et al., 2016)



Figure 2.13 Simulateur de moto Cruden
(Source :

<https://www.cruden.com/2017/05/19/commercially-available-motorcycle-simulator-for-professional-use-is-unveiled%E2%80%8B/>)



Figure 2.14 Simulateur de moto MotorcycleSim, Université de Nottingham (Stedmon et al., 2011)



Figure 2.15 Simulateur de moto DESMORI, Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (Will, 2017)



Figure 2.16 Simulateur de moto Université de Padoue (Cossalter, Lot, Massaro, et al., 2011)



Figure 2.17 Simulateur de moto MORIS, Ecole normale supérieure de Pise (Ferrazzin et al., 2003)



Figure 2.18 Simulateur de moto MOTORIST, Université Technique de Delft (Grottoli, 2021)

Tableau 2.1 Synthèse des buts de conception, nombre de degrés de liberté de la restitution de mouvement et modèle de véhicule utilisé pour les simulateurs de moto actuels

Simulateur	But	Liste des DDLs	Modèle implémenté
BMW Motorrad (Guth et al., 2016)	Recherche sur les facteurs humains	7 DDLs : Translations latérale, longitudinale, verticale Roulis, tangage, lacet Angle de guidon	Modèle multi-corps (détails non disponibles)
Cruden (Westerhof, 2018; Westerhof et al., 2019)	Ingénierie	7 DDLs	Modèle multi-corps fondé sur les travaux de Sharp et Alstead, 15 DDLs (Sharp & Alstead, 1980)
DESMORI – WIVW (Will, 2017)	Conception d'interfaces moto + formation + étude des comportements de conduite	7 DDLs	Information non disponible
DIGEM – Université de Padoue (Cossalter et al., 2010; Cossalter, Lot, & Massaro, 2011; Cossalter, Lot, Massaro, et al., 2011; Cossalter & Lot, 2002)	Interaction conducteur/moto	5 DDLs : Translation latérale Roulis, tangage, lacet Angle de guidon	Cossalter (2004, 2010), 14 DDLs Inclut le contre-braquage

Simulateur	But	Liste des DDLs	Modèle implémenté
Honda (prototype n°1)	Formation	5 DDLs : Translation latérale Roulis, tangage, lacet Angle de guidon	Sharp (Sharp, 1971), 4 DDLs
Honda (prototype n°2)	Formation	3 DDLs : Roulis, tangage Angle de guidon	Fonctionnel, 4 DDLs
Honda/Université de Tokyo	Réalisme de la sensation de conduite	7 DDLs	Katayama (Katayama et al., 1996), 4 DDLs
MORIS – Laboratoire PERCRO de l'École normale supérieure de Pise (Ferrazzin et al., 1999, 2001, 2003)	Ingénierie	7 DDLs	6 DDLs
MOTORIST – TU Delft (Celiberti et al., 2016; Grottoli, 2021; Grottoli et al., 2015; Kovacsova et al., 2015)	Formation	7 DDLs	Modèle multi-corps, 13 DDLs
MotorcycleSim – Université de Nottingham (Stedmon et al., 2011, 2012)	Ergonomie + Étude des comportements de conduite	2 DDLs : Roulis Angle de guidon	Meijaard (Meijaard et al., 2007) Inclut le contre-braquage
Static I – WIVW (Will, 2017)	Étude des comportements de conduite	1 DDL : Roulis (passif)	Information non disponible

Simulateur	But	Liste des DDLs	Modèle implémenté
Static II – WIVW (Will, 2018)	Étude des comportements de conduite	1 DDL : Roulis (passif)	Information non disponible
Université Nihon (Kageyama & Tagami, 2002)	Étude des comportements de conduite	3 DDLs : Roulis, tangage Angle de guidon	Adapté du modèle de Sharp (Sharp, 1971), 4 DDL

Le Tableau 2.2 synthétise les systèmes de restitution sensorielle qu'ils implémentent en plus de la restitution de mouvement. Les systèmes de restitution visuelle varient, mais la plupart des simulateurs utilisent des moniteurs ou un système de projection, et seulement deux utilisent un HMD. Tous les simulateurs intègrent un système de restitution visuelle.

Tableau 2.2 Synthèse des systèmes de restitution sensorielle visuelle, auditive, et haptique dans les simulateurs moto d'aujourd'hui

Simulateur	Restitution		
	Visuelle	Auditive	Haptique
BMW Motorrad	Projection frontale (3 x 4 m) + rétroviseurs réels et 2 écrans 46 pouces à l'arrière	Son 4.1	G-Vest pour les effets de forces longitudinales + 2 ventilateurs
Cruden	HMD	Son restitué par le HMD	
DESMORI - WIVW	1 écran cylindrique 4.5 x 2.8 m (champ de vision 220°) + 2 écrans 7 pouces pour les rétroviseurs	Son restitué par des écouteurs intégrés dans le casque	Système de tension de corde pour les effets de forces longitudinales
DIGEM – Université de Padoue	3 écrans plats (champ de vision 240°)	Son 5.1	

Simulateur	Restitution		
	Visuelle	Auditive	Haptique
Honda (prototype n°1)	1 écran attaché à la nacelle du simulateur (champ de vision 254 cm)		
Honda (prototype n°2)	1 écran plat (champ de vision 132 cm)	Son stéréo	
Honda/Université de Tokyo	Casque de réalité virtuelle	Source sonore variant selon la position de la tête	
MORIS – Laboratoire PERCRO de l'École normale supérieure de Pise	1 écran plat fixé au mur face au simulateur	Son spatialisé binaural restitué via un casque	
MOTORIST – TU Delft	HMD	Son restitué via des écouteurs intégrés dans le casque	
MotorcycleSim – Université de Nottingham	1 écran plat (champ de vision 2.5 m ²)	Son spatialisé restitué via des enceintes	
Static I - WIWV	Projection frontale 1.7 x 2 m	Son stéréo 2.0	Retour d'effort guidon par des bandes élastiques
Static II - WIWV	3 écrans 55 pouces + deux écrans 7 pouces dans les rétroviseurs	Son stéréo 2.0	
Université Nihon	1 écran plat (champ de vision 150°)	Son spatialisé	

Un simulateur de conduite moto est un objet complexe, et comme nous l'avons mentionné, les simulateurs de conduite moto sont développés avec des moyens moindres. Le recensement que nous avons réalisé des simulateurs de conduite moto montre de plus que beaucoup d'entre eux ont été conçus par des équipes de recherche. Le nombre limité de simulateurs de moto existants explique le nombre restreint de publications sur le sujet et le délai entre les différents travaux. Notre état de l'art permet néanmoins de mettre en évidence que les stratégies de restitution sensorielle mises en œuvre sont plus variées que pour les simulateurs de conduite automobile.

Pour la restitution visuelle, une autre possibilité que la projection sur des écrans est l'utilisation de HMDs, qui ont l'avantage d'être plus accessibles et de faciliter la mise à disposition d'une scène plus large (prise d'informations vers le bas notamment). Cependant, leur mise en œuvre peut être complexe sur des simulateurs à base mobile. En effet, dans ce cas, la tête du conducteur est en mouvement constant, et en l'absence de cabine fermée, et donc de point de référence externe « au-dessus » de la tête du conducteur, la localisation de cette dernière est complexe.

Pour la restitution de mouvement, les stratégies sont également plus variées. La principale difficulté est le couplage des mouvements de roulis et de tangage. Les amplitudes angulaires à exploiter peuvent être importantes et les points de rotation du mouvement de roulis et du mouvement de tangage sont différents : la moto étant un véhicule pendulaire, le centre de rotation théorique du roulis est « à l'infini », alors que celui du tangage est positionné, selon la manœuvre (freinage ou accélération), au niveau de la roue avant ou arrière.

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 est la gestion de l'équilibre du véhicule, difficile en simulation, et la moto est particulièrement instable à basse vitesse.

Ainsi, à notre connaissance, aucun de ces simulateurs 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 d'autant plus difficile à restituer sur simulateur de conduite. Ces situations seraient pourtant très utiles pour les études de comportement car une majorité des accidents se passe aux carrefours (Federation of European Motorcyclists'

Associations, 2016; Martensen & Roynard, 2013). 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. Le prototype de simulateur de conduite moto dont nous disposons (décrit dans le chapitre 4) ne permet pas encore d'étudier ce type de situations, mais les travaux que nous décrivons ici ont été effectués dans cet objectif.

2.4 CONCLUSION PARTIELLE

On constate qu'il y a deux approches de conception d'un simulateur de conduite. L'approche majoritaire, que ce soit pour la simulation de conduite automobile ou de moto, est la suivante : les concepteurs cherchent à créer les sensations les plus proches possibles de la réalité pour le conducteur, et celui-ci doit ensuite s'adapter aux sensations disponibles ou non. Sur des simulateurs qui ne peuvent pas reproduire la physique des phénomènes à l'échelle 1, ce choix peut poser un problème car le conducteur, qui arrive avec une expérience de conduite antérieure, anticipe (inconsciemment) quels retours sensoriels il devrait recevoir et quelle évolution du véhicule devrait résulter de ses actions. Si les retours sensoriels ne correspondent pas à ses attentes, il risque d'être perturbé, de ne pas contrôler le véhicule virtuel, voire d'être malade. Une autre approche de conception serait de comprendre dans un premier temps le conducteur, sa perception, et de quelles interactions il va avoir besoin pour que le simulateur soit contrôlable et valide d'un point de vue subjectif. C'est cette approche que nous préconisons et le chapitre suivant a pour objectif de présenter les questions et problématiques qui la sous-tendent et la motivent.

3 LE SIMULATEUR RESSENTI PAR LE CONDUCTEUR VS LE CONDUCTEUR DANS LA BOUCLE

3.1 LE MAL DU SIMULATEUR

Le mal du simulateur est une réaction physiologique négative à une situation de conduite simulée qui s'apparente dans une certaine mesure au mal des transports (mal des transports), notamment par leurs symptômes similaires. Ces symptômes sont souvent classifiés en trois groupes : (1) symptômes oculomoteurs, par exemple vision trouble ou mal de tête, (2) désorientation, et (3) nausée (Kennedy et al., 1993) et peuvent varier en type et intensité en fonction de l'individu (Schweig et al., 2018) et/ou la situation. Cependant, le mal des transports affecte principalement les passagers, alors que tous les usagers de simulateurs de conduite peuvent souffrir de mal du simulateur (Rolnick & Lubow, 1991). Casali et Wierwille ont montré qu'il existe un lien entre cette différence de susceptibilité au mal du simulateur par rapport au mal des transports et la différence en termes de degré de contrôle et de possibilité d'anticipation dans ces deux situations (Casali & Wierwille, 1986). En particulier, les symptômes du mal du simulateur dépendent de la tâche simulée à accomplir (Kolasinski, 1995) : par exemple, la prise de virage est l'une des tâches les plus inductrices de mal du simulateur, à plus forte raison pour les plus petits rayons de courbures. Les environnements riches, tels que les carrefours urbains, sont également particulièrement problématiques. Cependant, ces situations ne peuvent être exclues des expériences sur simulateurs de conduite. Elles sont en effet d'un grand intérêt à la fois pour la recherche sur la sécurité routière, les campagnes de sensibilisation et d'éducation du grand public à ce sujet, ainsi que dans les applications de formation / réentraînement.

Le mal du simulateur est susceptible d'être néfaste à la durée et/ou à la performance des usagers pour toutes les expériences menées sur simulateur de conduite (Bittner et al., 1997; Liebherr et al., 2020; Money, 1970; Schweig et al., 2018), au point pour certains usagers de quitter prématurément l'expérience. De plus, si un conducteur sensible ne quitte pas l'expérience de sa propre initiative parce qu'il souffre de symptômes du mal du simulateur, les expériences sur simulateur de conduite ne sont souvent arrêtées que lorsque l'expérimentateur est obligé de le faire (par exemple, après que le conducteur a vomi). Dans ce cas, cela constitue une mauvaise expérience pour le conducteur, qui risque de développer une préconception négative des simulateurs de conduite en général. Cela peut conduire au refus définitif de participer à d'autres expériences sur simulateur de conduite. Si, malgré tout, la personne accepte de prendre part à d'autres expériences, cet

a priori négatif peut produire de l'anxiété et de l'inconfort avant et pendant celles-ci (Liebherr et al., 2021). Or l'anxiété et l'inconfort sont liés à l'occurrence du mal du simulateur (Bertin et al., 2004; Stelling et al., 2021). La population âgée est identifiée comme particulièrement sensible au mal du simulateur.

Pour les expérimentations sur simulateurs, il existe de fait un filtrage de la population étudiée, parfois volontaire, « à la porte », mais aussi pendant les phases d'accoutumance, de sorte à ne conserver que la population non sensible au mal du simulateur (ce processus est représenté schématiquement sur la Figure 3.1). Des études récentes rapportent des taux d'abandon en raison de mal du simulateur allant de 5% à 30% lorsque les participants font partie du grand public (Liebherr et al., 2020; Saredakis et al., 2020). Matas et al. ont rapporté un taux d'abandon de 59% pour une expérience où les participants étaient tous des personnes âgées (Matas et al., 2015). En outre, il est à noter que les taux d'abandon annoncés n'incluent pas forcément le filtrage effectué en amont de l'expérience, en particulier l'exclusion des participants malades pendant les phases d'accoutumance, et sont donc souvent sous-estimés. La question de l'occurrence du mal du simulateur est critique car il biaise les résultats acquis grâce aux simulateurs de conduite et/ou limite la population qui peut les utiliser.

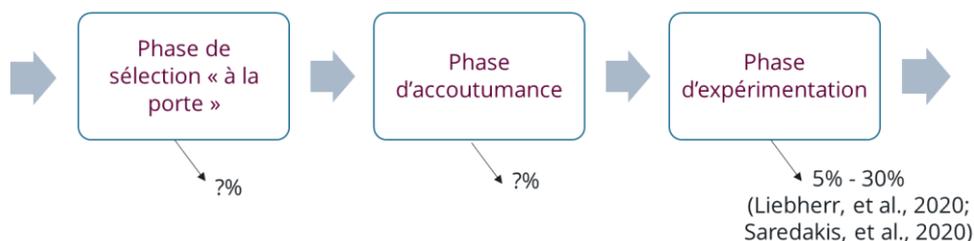


Figure 3.1 Processus de filtrage dû au mal du simulateur

Le mal du simulateur est souvent attribué exclusivement, à l'image du mal des transports, à un conflit sensoriel (Reason, 1978; Reason & Brand, 1975). Un conflit sensoriel peut être : un conflit entre les retours visuel, haptique et vestibulaire, un échec de l'intégration multisensorielle, ou un conflit entre mouvement attendu et mouvement réel, c'est-à-dire un conflit avec le(s) modèle(s) interne(s) du conducteur (Bos et al., 2008; Bos & Bles, 2002; Oman, 1990). Toutefois, les individus vestibulolésés sont a priori immunisés au mal des transports, mais il a été montré qu'ils peuvent être susceptibles au mal du simulateur comme les individus dont le système vestibulaire est intact (Bertin et al., 2004). Des chercheurs ont montré que la stimulation multisensorielle, en particulier la restitution de mouvement, limite l'occurrence du mal du simulateur pour les usagers des simulateurs de conduite mais ne l'élimine pas totalement (Curry et al., 2002; Grácio et al., 2011; Pinto

et al., 2008; Watson, 2000). En ce qui concerne le rôle d'un potentiel conflit avec le(s) modèle(s) interne(s), cette hypothèse est étayée par le fait que des sujets initialement sensibles au mal du simulateur sont moins fréquemment malades après des séances d'entraînement sur simulateur de conduite (Hoffmann et al., 2003) (Hoffmann, et al., 2003) : celles-ci permettent en effet aux sujets d'apprendre et de s'adapter. Des travaux récents ont démontré que l'imprévisibilité des mouvements subis augmente la gravité du mal des transports (Kuiper, Bos, Schmidt, et al., 2020) mais que cet effet peut être atténué en ajoutant un signal auditif qui permet d'anticiper ces mouvements (Kuiper, Bos, Diels, et al., 2020). En s'appuyant sur les précédents modèles computationnels du mal des transports, Wada a récemment proposé un modèle computationnel décrivant les effets de l'apprentissage de la dynamique et de la prédiction de mouvement sur l'incidence du mal des transports (Wada, 2021). Cependant, les recherches sur le rôle précis du (ou des) modèle(s) interne(s), c'est-à-dire de l'anticipation, dans la simulation de conduite et donc son influence sur le mal du simulateur sont encore limitées.

La théorie de l'instabilité posturale est une autre hypothèse qui a été proposée pour expliquer le mal des transports et le mal du simulateur (Riccio & Stoffregen, 1991; Stoffregen & Riccio, 1991). Les simulateurs de conduite étant des environnements mobiles inconnus, leur utilisation nécessite pour le conducteur d'établir des stratégies de contrôle spécialisées, en particulier pour le contrôle postural. Cette théorie postule que les conducteurs susceptibles de souffrir du mal du simulateur le sont du fait de leur incapacité à établir une stratégie adéquate pour maintenir leur stabilité posturale lorsqu'ils conduisent un simulateur de conduite. D'autres travaux ont montré que l'instabilité posturale précède l'apparition des symptômes du mal du simulateur (Bonnet et al., 2006; Stoffregen & Smart, 1998), ainsi qu'une corrélation entre les deux (Faugloire et al., 2007; van Emmerik et al., 2011; Yokota et al., 2005), sans toutefois prouver que l'instabilité posturale est une condition nécessaire et suffisante à l'occurrence du mal du simulateur. Enfin, certains auteurs avancent que le mal des transports ou le mal du simulateur et l'instabilité posturale sont en fait deux effets d'une cause commune : un conflit sensoriel (Bos, 2011; Kennedy & Stanney, 1996).

En simulation de conduite, le conducteur ne conduit pas un véhicule réel mais téléopère un modèle de véhicule, c'est-à-dire qu'il conduit à distance un modèle de véhicule en s'appuyant sur la seule sous-partie des stimuli sensoriels de la situation de conduite réelle reproduite par le simulateur. Les règles de contrôle-commande propres à la téléopération peuvent donc s'appliquer. Dans ce cadre, la non-contrôlabilité du simulateur de conduite peut entraîner des mouvements irréguliers et oscillants du véhicule virtuel qui induisent des mouvements de rotation incontrôlés de l'image, négativement corrélés à l'occurrence du mal du simulateur (Golding et al., 1995, 2003). De plus, des difficultés

de contrôle peuvent entraîner de l'anxiété et de l'inconfort pour le conducteur, qui sont également négativement corrélés au mal du simulateur (Bertin et al., 2004; Stelling et al., 2021).

Nous postulons que la non-contrôlabilité d'un simulateur de conduite provient de la non-adéquation entre la complexité du modèle de véhicule sous-jacent, d'une part, et la complexité de l'architecture du simulateur d'un point de vue matériel, d'autre part, quelles que soient leurs fidélités intrinsèques respectives. La fidélité des stimuli sensoriels par rapport à ceux d'une vraie situation de conduite est limitée par la complexité architecturale du simulateur. Notre hypothèse est qu'un meilleur contrôle du véhicule est possible lorsque la fidélité du modèle et la fidélité sensorielle sont en adéquation. Un bon contrôle minimise les mouvements erratiques du véhicule virtuel et l'occurrence du mal du simulateur est donc réduite, le respect des attentes de l'opérateur par le système étant l'aspect le plus important pour le contrôle.

Notre hypothèse ne réfute pas les théories précédemment avancées, mais les englobe. En effet, les mouvements erratiques et oscillants du véhicule virtuel et les translations et rotations d'images qui en résultent sont inattendus du point de vue du conducteur, ce qui constitue un conflit sensoriel. De plus, les difficultés de contrôle contribuent à l'anxiété du conducteur. Nous pensons que l'instabilité posturale peut être identifiée comme une conséquence de l'anxiété du conducteur, ce qui expliquerait la corrélation entre l'instabilité posturale et les symptômes du mal du simulateur.

3.2 QUESTIONS OUVERTES POUR L'INSTRUMENTATION D'UN SIMULATEUR DE CONDUITE

Un système avec un être humain dans la boucle est défini par opposition à un système conçu pour fonctionner "à côté" de l'utilisateur humain. L'opérateur doit être identifié et intégré comme faisant partie de la boucle pour que l'ensemble du système soit acceptable du point de vue de l'homme. L'acronyme simulation HUIL (pour *Human-In-The-Loop*), que l'on trouve dans la littérature, décrit ce type de système. Cette abréviation devrait, à notre avis, être employée plutôt que HIL ou HITL, qui peuvent également décrire la simulation *Hardware-in-The-Loop* (c'est-à-dire tester du matériel réel dans une boucle de simulation, alors que dans notre cas, nous testons un être humain dans une boucle de simulation).

L'instrumentation d'un système est généralement fondée sur la connaissance de son environnement et sur les spécifications des cas d'utilisation. Cela est rendu possible grâce au fait que dans la nature, tout stimulus ou combinaison de stimuli (les entrées du système) produit toujours une réaction (les sorties). La relation entre les stimuli et la

réaction à ceux-ci (fondée sur le modèle ou la boîte noire) dépend de la nature de l'endroit où le système est impliqué : physique (par exemple, mécanique, hydraulique, élastique, etc.) ou biologique.

De son côté, l'être humain est un initiateur. Lorsqu'il effectue une action ou une combinaison d'actions, il le fait dans l'attente d'un résultat. Les résultats de toute action effectuée sont anticipés par le cerveau humain à l'aide d'un modèle de mouvement prédictif appelé modèle interne. Dans le contrôle sensorimoteur humain, le modèle interne est un modèle dynamique du système sensorimoteur appris et renforcé par l'expérience. Il existe une littérature abondante à ce sujet, tant du point de vue de la biologie computationnelle que de la description des données comportementales, neurophysiologiques et d'imagerie soutenant le concept de modèle interne dans le contrôle moteur humain. L'être humain perçoit le résultat réel de ses actions sous forme de stimuli sensoriels par l'intermédiaire de ses systèmes sensoriels. Ce retour sensoriel est comparé (inconsciemment) au retour sensoriel prédit par le modèle interne.

Cette différence majeure de comportement est ce qui constitue le défi de l'instrumentation d'un système homme-machine. Le comportement de l'être humain impliqué n'est pas et ne peut pas être bien défini ; il dépend de nombreux facteurs, tels que l'expérience (comme déjà mentionné), l'état d'esprit, la fatigue, etc. Ce point est particulièrement crucial à prendre en compte lorsque l'être humain joue un rôle actif. Ainsi, lors de l'instrumentation d'un système homme-machine, le but n'est pas de modéliser l'être humain comme on l'aurait fait pour tout autre système naturel, mais de se concentrer sur les tendances du comportement. Il faut trouver un compromis qui permette au système d'être (1) utilisé comme prévu tout en étant (2) perçu comme contrôlable et acceptable par l'opérateur humain.

Pour tous les simulateurs HUIL, il est nécessaire d'instrumenter le système dans les deux buts suivants : (1) capturer les actions de l'opérateur ; et (2) lui fournir un retour sensoriel. Plus le conducteur interagit étroitement avec son véhicule pour en contrôler la trajectoire, plus la conduite est difficile à simuler. Pour les voitures, les interactions se font principalement par le volant, alors que pour les véhicules à deux roues, les interactions sont plus complexes, en raison de la contrainte de maintien de l'équilibre du véhicule.

Du point de vue du véhicule simulé, les actions du conducteur, c'est-à-dire les entrées du modèle, sont perçues à l'aide de capteurs. Les réactions du véhicule à ces stimuli, c'est-à-dire les sorties du modèle, sont rendues par des actionneurs. Le conducteur perçoit ces réactions en termes de retour sensoriel, notamment visuel, kinesthésique, haptique et

auditif. Du point de vue du conducteur, le retour sensoriel est constitué de données de capteurs.

Un premier défi pour la conception d'un simulateur de conduite HUIL est son instrumentation, car le conducteur humain est à la fois l'initiateur de la physique (cinématique et dynamique du mouvement) et le récepteur des différents retours résultant de ses actions. Un deuxième défi consiste à fournir au conducteur un retour d'information qui corresponde à ses attentes en fonction de son expérience de la conduite. L'incongruence entre les réactions du système et les attentes du conducteur humain peut induire le mal du simulateur (Bos et al., 2008; Bos & Bles, 2002; Oman, 1990), ce qui peut, à son tour, conduire à un biais dans les résultats acquis en utilisant les simulateurs de conduite. Au contraire, la congruence entre les réactions du système et les attentes du conducteur humain garantit l'acceptabilité du système du point de vue du conducteur.

Nos travaux de thèse portent sur un simulateur dynamique de moto de type « *rider-in-the-loop* » (le terme *driver-in-the-loop* est utilisé pour les simulateurs de conduite automobile). Comme nous l'avons montré dans la section précédente, il existe aujourd'hui très peu de simulateurs de conduite de moto. Ils ont été conçus pour répondre à différents objectifs, avec des approches variées en fonction de facteurs tels que l'application souhaitée et les domaines d'expertise des chercheurs qui les ont conçus. Pour cette raison, ils ne peuvent pas vraiment être comparés. Cependant, à notre connaissance, seule une très petite partie de la littérature décrit les stratégies de conception des simulateurs de motos. Les recherches existantes sont principalement axées sur la prise en compte des contraintes de conception mécaniques et dynamiques et non sur l'instrumentation du système. C'est pourquoi nous proposons une approche axée sur la contrôlabilité par l'humain, qui peut prendre en compte d'autres spécifications de conception. Nous pensons que la contrôlabilité est un point crucial pour toutes les applications des simulateurs de motos. Si le simulateur n'est pas contrôlable pour le conducteur (et donc acceptable par lui), la validité des résultats obtenus est remise en question.

3.3 MODALITES D'INTERFAÇAGE CAPTEURS/ACTIONNEURS : EXEMPLES POUR UN SIMULATEUR DE CONDUITE

Les simulateurs de conduite « humain-dans-la-boucle » sont des systèmes particulièrement complexes, car mettant en jeu des aspects à la fois du domaine des sciences, technologies, ingénierie et mathématiques et du domaine des sciences humaines et sociales. Il faut donc se poser la question de concepts comme l'acceptabilité, qui est subjective pour un individu mais vérifiable pour un groupe de personnes.

Dans le contexte de la simulation de conduite, c'est-à-dire un monde physique simulé, tout stimulus ou ensemble de stimuli produit par le conducteur (donc toutes les mesures des entrées capteurs du « système simulateur ») est combiné avec :

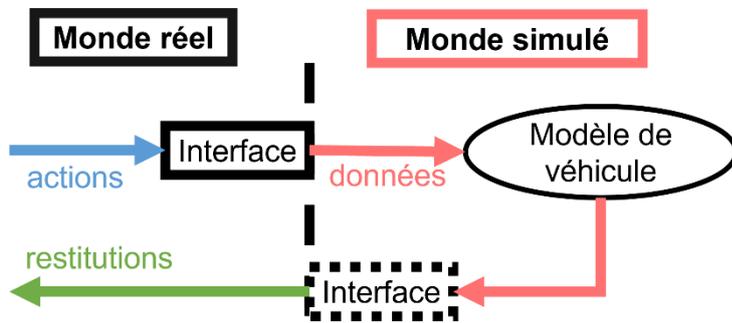
1. la réaction physique dérivée, du modèle calculé, du véhicule dans son environnement (c'est-à-dire les actions de sortie restituées par les actionneurs du système simulateur) ;
2. et avec les effets intrinsèques des actions du conducteur sur le système physique.

En retour, le comportement du système a des effets sur le conducteur, qui est l'élément qui ferme la boucle. Dans ce chapitre, nous positionnons notre regard plutôt du côté du système que du côté conducteur, mais la discussion réciproque sera abordée dans d'autres chapitres de ce manuscrit.

Dans cette logique, on conçoit bien que les interfaces qui peuvent être utilisées entre le conducteur et le monde physique pour capturer les actions du conducteur et restituer les actions et les comportements du véhicule simulé peuvent être de types très variables. Pour différencier ces interfaces, nous noterons un capteur C , un actionneur A , un objet virtuel V , et un objet réel R .

Pour un simulateur de conduite, les interfaces capteurs/actionneurs utilisées peuvent être classifiées de la façon suivante :

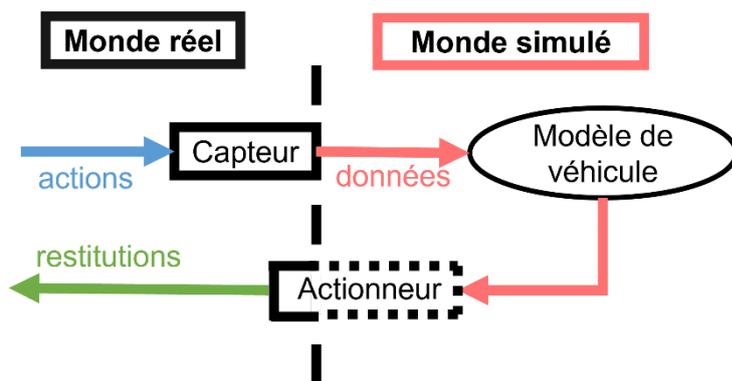
- Une interface dite « simple », avec un capteur virtuel C_V et un actionneur virtuel A_V , notée $C_V A_V$. Le fonctionnement d'une interface de ce type est représenté schématiquement par la Figure 3.2.a, et la Figure 3.2.b en donne des exemples : un écran, une souris et un clavier.
- Un capteur réel C_R seul ou en conjonction avec un actionneur virtuel A_V . Le fonctionnement d'une telle interface, notée $C_R A_V$, est représenté schématiquement par la Figure 3.3.a. Pour ce type d'interfaces, il n'y a pas de couplage physique entre le capteur et l'actionneur. Il est toutefois important de noter qu'un actionneur virtuel peut être partiellement réel, par exemple s'il est à retour kinesthésique ou haptique. La Figure 3.3.b montre un exemple d'une interface $C_R A_V$: un joystick en forme de volant. Il existe également des joysticks en forme de guidon de moto, mais ils sont plutôt rares, c'est pourquoi nous avons choisi cet exemple malgré l'intérêt principal de nos travaux pour la simulation de conduite moto.



(a)

(b)

Figure 3.2 (a) Représentation schématique d'une interface capteur virtuel/actionneur virtuel (en bleu : actions du conducteur, et en rouge : données d'entrée et de sortie du modèle de véhicule) ; (b) Exemples d'une interface capteur virtuel/actionneur virtuel : écran, souris et clavier



(a)

(b)

Figure 3.3 (a) Représentation schématique d'une interface capteur réel/actionneur virtuel (en bleu : actions du conducteur, et en rouge : données d'entrée et de sortie du modèle de véhicule). (b) Un exemple d'interface capteur réel/actionneur virtuel : un joystick volant

- Un capteur réel C_R en conjonction avec un actionneur réel A_R . Le fonctionnement d'une interface de ce type, notée $C_R A_R$, est représenté schématiquement par la Figure 3.4.a et la Figure 3.4.b en donne un exemple, à savoir la colonne de direction de notre simulateur de conduite moto, que nous décrirons plus en détail dans d'autres chapitres. En ce qui concerne ce type d'interface, le capteur et l'actionneur fournissent tous deux des données au modèle de véhicule (ce qui est représenté par les relations A et B dans la Figure 3.4). En particulier, les actions humaines produisent des données capteurs (A) et un mouvement intrinsèque de l'actionneur,

lequel produit également des données d'entrée pour le modèle de véhicule (B : modification de la position physique). Le modèle de véhicule commande l'actionneur (relation C). De plus, il existe un couplage physique significatif entre le capteur et l'actionneur (relation D).

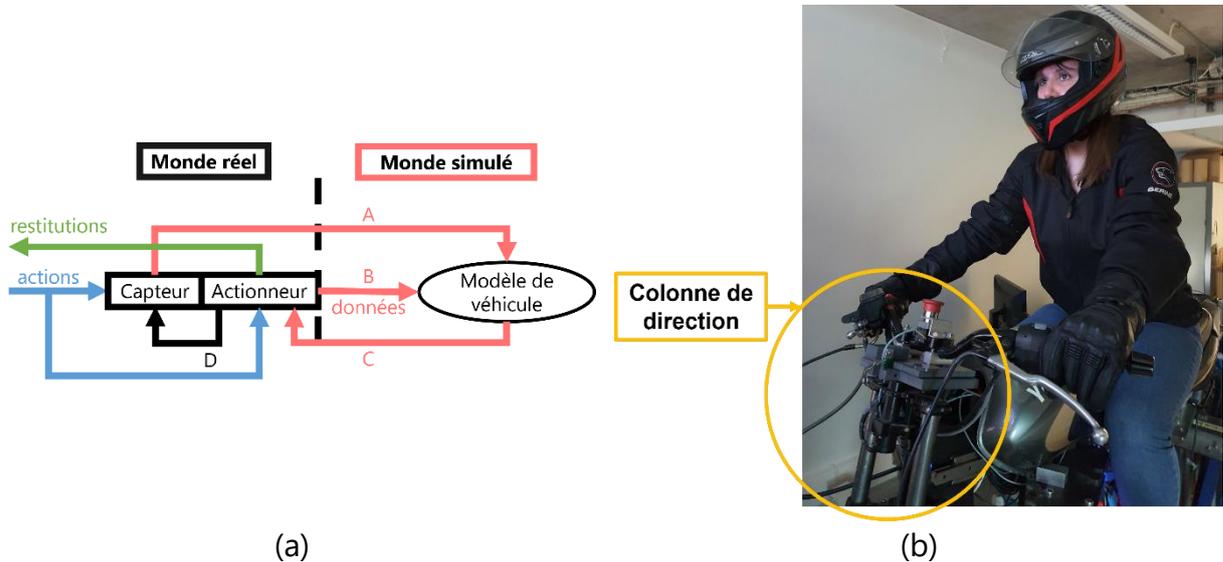


Figure 3.4 (a) Représentation schématique d'une interface capteur réel/actionneur réel (en bleu : actions du conducteur, et en rouge : données d'entrée (relations A et B) et de sortie (relation C) du modèle de véhicule ; relation D : couplage physique). (b) Exemple d'interface capteur réel/actionneur réel : la colonne de direction de notre simulateur de conduite moto.

Le choix d'interfaces capteurs/actionneurs à inclure pour la construction d'un simulateur de conduite parmi les catégories présentées doit être fait avec soin, selon les spécifications à prendre en compte – par exemple, le domaine d'application.

À noter : si nous nous étions intéressés à d'autres types de simulateurs HUIL que les simulateurs de conduite, d'autres exemples d'interfaces auraient pu être intéressants, par exemple les interfaces haptiques PHANTOM.

3.4 CONCLUSION PARTIELLE

L'instrumentation d'un système est généralement fondée sur la connaissance de son environnement et sur les spécifications des cas d'utilisation de ce système. L'instrumentation d'un simulateur de conduite pose des questions plus complexes. Au centre du simulateur se trouve un être humain, le conducteur, qui, par ses actions, initie le déplacement du véhicule virtuel et les mouvements de la plate-forme mobile, et qui est le récepteur des stimuli sensoriels que le simulateur de conduite est capable de produire. Nous avons donc dans un premier temps étudié le fonctionnement de la perception

humaine et confronté ces informations à l'étude des restitutions sensorielles proposées par les simulateurs de conduite de moto existants à ce jour. Cette étude nous a permis de soulever un potentiel problème dans l'approche utilisée pour la conception d'un simulateur de conduite pour la contrôlabilité de ce simulateur. Or, la validité et l'acceptabilité d'un simulateur dépendent fortement de sa contrôlabilité. Nous allons donc utiliser une autre approche pour repenser les modalités d'interfaçage conducteur/simulateur d'un simulateur de conduite moto préexistant : architecture matérielle et logicielle, structure capteurs/actionneurs de la colonne de direction, modèle de véhicule implémenté.

4 NOTRE SIMULATEUR DE CONDUITE MOTO

4.1 DESCRIPTION GENERALE

Le développement de notre simulateur de conduite moto (photo de la Figure 4.1) a commencé en 2006 dans le cadre du projet de recherche SIMACOM (SIMulateur pour l'Apprentissage de la Conduite de deux-roues Motorisé), supporté par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Le projet SIMACOM était une collaboration entre le laboratoire MSIS (INRETS), le laboratoire IBISC (Université d'Evry Val d'Essonne), et l'IEF (Université Paris-Sud - l'équipe en question fait maintenant partie du laboratoire SATIE de l'Université Paris-Saclay) (Nehaoua, 2008). Son objectif était double : développer un simulateur permettant à la fois la formation des conducteurs au risque de la conduite moto et l'étude des comportements de conduite en conditions de conduite normale.

Depuis, le simulateur a été utilisé dans plusieurs expérimentations « centrées conducteur » (études les plus récentes : (Boets et al., 2020; Bougard et al., 2020, 2021; Michel et al., 2022)), mais les sensations qu'il procure au conducteur sont toujours éloignées de la réalité et il reste donc à ce jour un objet de recherche et est toujours en cours de raffinement. C'est au niveau du raffinement « système » que se positionnent mes travaux.



Figure 4.1 Notre simulateur de conduite moto

Le simulateur est construit à partir d'un châssis de moto Yamaha YBR 125 cm³ sans roue ni suspension de sorte à en réduire la masse et l'inertie¹. Le châssis est fixé sur un cadre

¹ Le châssis peut être remplacé par un autre châssis avec un réservoir de dimensions plus importantes, ce que nous avons fait pour l'expérimentation décrite dans le dernier chapitre de ce manuscrit.

métallique. Il s'agit de la partie supérieure de la plate-forme mobile du simulateur. La partie inférieure de cette plate-forme est composée d'un bâti servant de support pour le montage des actionneurs qui permettent la restitution de mouvement.

Notre simulateur de conduite moto, dans sa version « actuelle », est constitué des éléments suivants :

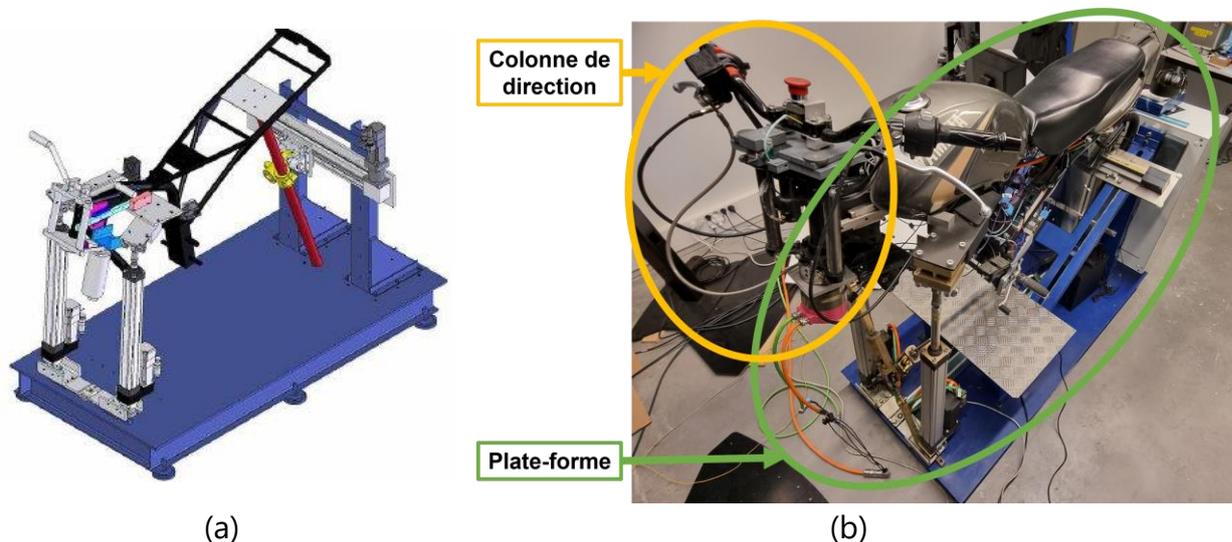
- **pour la restitution visuelle** : trois écrans fixes (télévisions 55 pouces), assemblés bord à bord pour obtenir un champ visuel quasi-continu. Les écrans sont disposés en forme de pseudo-cercle, dont le centre est la tête du conducteur, offrant ainsi à ce dernier un champ de vision FOV = 130° (abrégé de *Field Of View*), avec une résolution d'image de 1920 x 1080 pixels par écran, soit approximativement 44 Pixels Par Degré (PPD) ;
- **pour la restitution auditive** : un système sonore 5.1 ;
- **pour la restitution de mouvement** : une colonne de direction motorisée, que nous appellerons « corps dynamique n°1 » dans la suite, avec deux Degrés De Liberté (abrégé DDLs) :
 - un guidon à retour haptique,
 - et une fonctionnalité pseudo-haptique restituant les stimuli haptiques correspondant à l'effort (de flexion ou d'extension) dans les bras du conducteur dû aux mouvements de son buste dans les phases d'accélération longitudinale et de freinage (de décélération) ;
- **également pour la restitution de mouvement** : la plate-forme mobile, que nous appellerons « corps dynamique n°2 » par la suite, avec trois DDLs : roulis (plage de débattement $\pm 12.5^\circ$), tangage (plage de débattement $\pm 10^\circ$) et lacet (plage de débattement $\pm 10^\circ$). Comme le simulateur est un simulateur à structure parallèle, les DDLs sont couplés et l'amplitude des mouvements est de ce fait limitée (en particulier pour le roulis et de tangage). En plus de cela, des études psychophysiologiques portant sur les simulateurs de conduite moto en général (Yamasaki et al., 1998) et sur notre simulateur en particulier (Arioui et al., 2010; Nehaoua et al., 2007; Shahar et al., 2014) ont montré que les plages de débattement doivent être limitées pour des questions de ressenti du conducteur. C'est de cette manière que nous arrivons à ces chiffres ;
- **pour la mise en situation du conducteur** : tous les organes de commande d'une moto : commodos gauche et droit (feux, clignotants, klaxon, démarreur), accélérateur, embrayage, freins avant et arrière, boîte de vitesses.

4.2 STRUCTURE GENERALE

La structure physique de notre simulateur moto est bi-corps, comme représenté par la Figure 4.2. Cette structure est inspirée par l'étude de la dynamique moto, qui met en évidence deux groupes de DDLs :

1. le DDL de la colonne de direction, c'est-à-dire l'angle du guidon ;
2. les rotations de la moto, c'est-à-dire le roulis, le tangage et le lacet (Cossalter, 2006).

La version du simulateur antérieure à mes travaux n'était pas articulée autour de cette structure. Il y avait deux configurations possibles de l'architecture de calcul, qui sont représentées dans la Figure 4.3.



Dans le cas de l'architecture du système présentée dans la Figure 4.3.a, il n'était possible que de fonctionner en boucle ouverte pour le pilotage du guidon, un problème sur lequel nous reviendrons dans le chapitre suivant. Dans le cas de l'autre variante (Figure 4.3.b) le problème posé était surtout la complexité de l'architecture faisant intervenir plusieurs PCs. L'objectif de mes travaux concernant la structure de fonctionnement du simulateur était donc double : simplifier l'architecture logicielle du simulateur et en améliorer les performances d'un point de vue calculatoire. Pour ce faire, nous avons choisi de nous appuyer sur cette structure bi-corps pour mettre en place une architecture de calculs distribuée. La plupart des calculs sont effectués par différents microcontrôleurs, les amenant ainsi au plus proche des actionneurs physiques concernés.

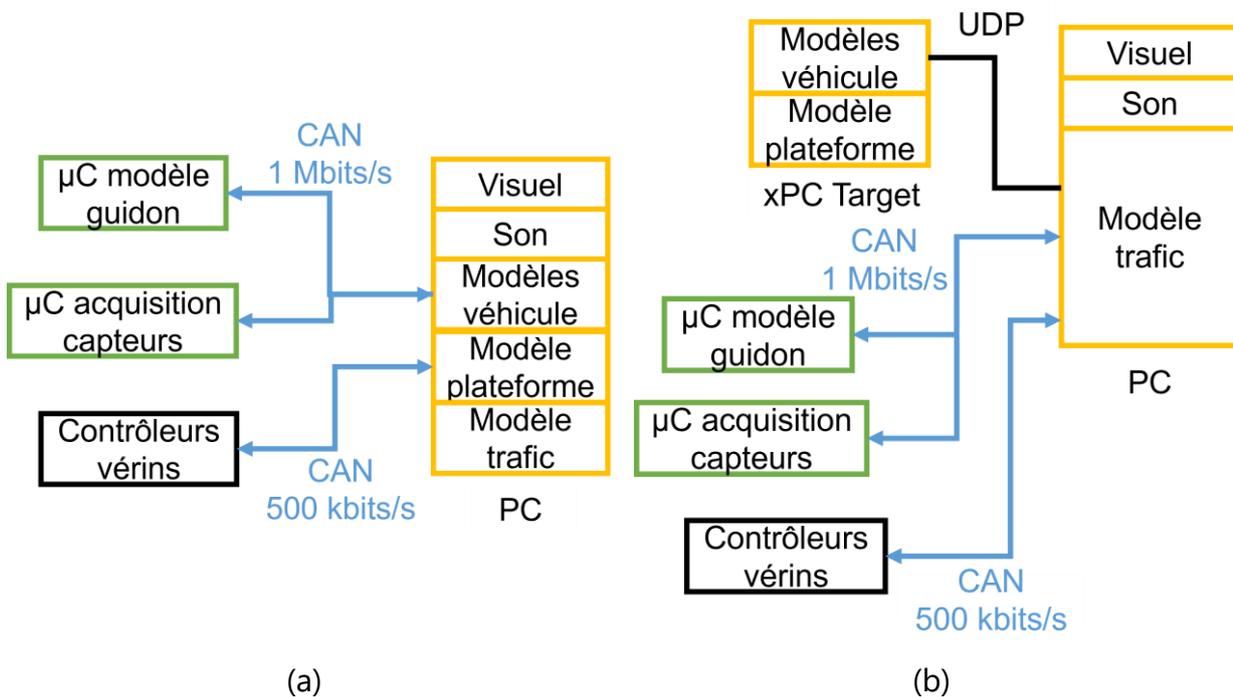


Figure 4.3 (a) Architecture fonctionnelle antérieure du simulateur avec calcul du modèle de véhicule sur un PC standard ; (b) Architecture fonctionnelle du simulateur avec calcul du modèle de véhicule sur un PC xPC Target (Matlab/Simulink temps réel)

Tous les phénomènes physiques intervenant dans la conduite d'une moto ne peuvent pas être reproduits physiquement par un simulateur. Nous avons notamment pris l'exemple de la reproduction physique des forces centrifuge et centripète pour illustrer ce point plus haut dans ce manuscrit. Les phénomènes physiques manquants doivent être modélisés et simulés au moins en partie de manière calculatoire. Cette « physique manquante » est multimodale. Dans la réalité, tous les phénomènes sont liés par le temps, qui est une variable unificatrice. En simulation, il faut par conséquent a minima garantir pour le conducteur la cohérence temporelle de la physique simulée pour maintenir la contrôlabilité et l'acceptabilité. Or, sur un PC utilisant un système d'exploitation « standard » (non-temps réel), le parallélisme des calculs ne peut pas être garanti, ni la latence stricte : à moins d'utiliser un système d'exploitation temps réel, le comportement de calculs d'un PC est non-stationnaire – parfois favorable, mais parfois défavorable. L'architecture antérieure du simulateur représentée sur la Figure 4.3.a laissait beaucoup de charge de calcul à un PC. Nous avons décidé pour pallier le problème de ralentissements des calculs dont elle souffrait d'utiliser un ou plusieurs(s) calculateur(s) embarqué(s) dédié(s) pour chaque corps dynamique du simulateur, c'est-à-dire de paralléliser physiquement les calculs.

Le modèle de véhicule est également implémenté sur un ordinateur dédié au plus proche des corps physiques de notre simulateur de conduite moto. De cette manière, la latence maximale des calculs est égale au temps de calcul maximal, au lieu de la somme de tous les temps de calcul sur un PC (dans le pire des cas, c'est-à-dire si tous les calculs sont faits en série).

Les ordinateurs embarqués échangent des données les uns avec les autres, ainsi qu'avec un PC centralisé. Ce dernier se charge des calculs d'un modèle de trafic multi-agent et de la restitution visuelle et auditive de l'environnement du véhicule simulé pour le conducteur. Ce PC peut également servir comme un enregistreur de données, ce qui est souvent nécessaire pour le besoin des expérimentations mises en place.

L'architecture matérielle et logicielle du simulateur à l'issue de nos travaux est représentée schématiquement en Figure 4.4. Cette représentation permet de mettre en évidence, en plus de la structure physique bi-corps du simulateur, le fait que notre simulateur de conduite moto est composé de deux sous-parties :

1. le véhicule simulé, sur lequel portent nos travaux ;
2. et l'environnement de simulation dans lequel le simulateur est accueilli.

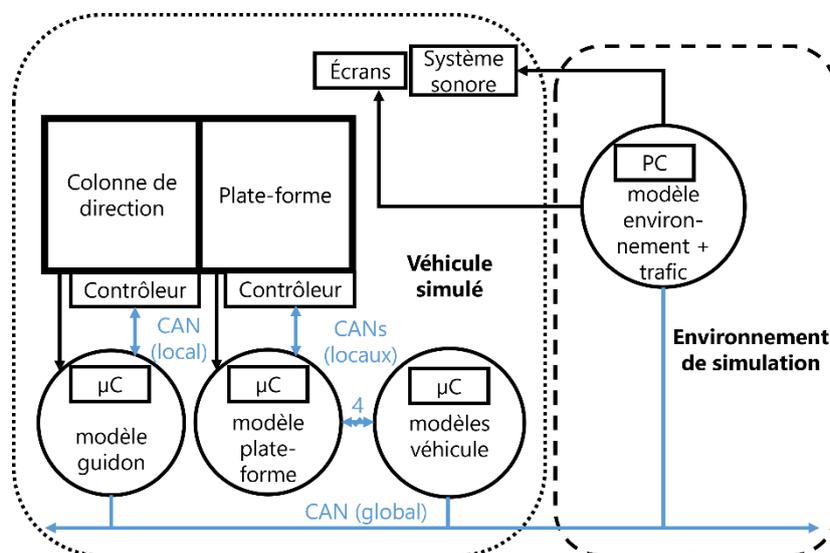


Figure 4.4 Architecture matérielle/logicielle générale du simulateur moto : véhicule simulé (zone en pointillé à gauche) et environnement de simulation (zone en traitillé à droite)

Le microcontrôleur estampillé « modèles véhicule » dédié calcule deux modèles : un modèle de moteur (cinématique de la moto) et un modèle dynamique (modèle de Meijaard (Meijaard et al., 2007) adapté ou modèle fonctionnel).

4.3 INTERFACES CONDUCTEUR/MOTO ET MONDE SIMULES

Notre simulateur intègre différents types de capteurs et d'actionneurs qui sont soit virtuels soit réels. D'un point de vue « système », il apparaît qu'un simple mouvement du conducteur implique à la fois une mesure (par un capteur, par exemple un capteur de force) et une modification de la physique du simulateur (par exemple, une modification du centre de gravité du système). On conçoit donc bien qu'il peut y avoir plusieurs manières possibles de combiner des capteurs et des actionneurs virtuels ou réels pour faire le lien entre le conducteur et la moto simulée, tout en maintenant la contrôlabilité du simulateur et l'acceptabilité de l'illusion de conduite. A noter : l'illusion de conduite, au-delà des restitutions sensorielles mises en place, passe aussi significativement par la qualité de l'environnement routier simulé (et reproduit) et du comportement des divers autres acteurs simulés (par exemple d'autres véhicules ou des piétons) (Espié et al., 2005).

Les interfaces utilisées dans notre simulateur de conduite moto sont classifiées dans le Tableau 4.1, en utilisant les notations du chapitre précédent (section au sujet des interfaces).

Tableau 4.1 Classification des interfaces capteurs/actionneurs de notre simulateur de conduite moto

Capteur/Actionneur	Actionneur virtuel	Actionneur réel
Capteur virtuel	Écrans Haut-parleurs	N.A.
Capteur réel	Organes de commande de la moto	Corps dynamique n°1 : colonne de direction Corps dynamique n°2 : plateforme

Les interfaces les plus complexes sont celles qui mettent en jeu un capteur réel et un actionneur réel, du fait du couplage physique inhérent qui entre en jeu dans ce type d'interfaces.

5 APPROCHE CENTREE CONTROLABILITE, VERSANT N°1 : GUIDON DE MOTO ET STIMULI HAPTQUES

La conduite d'une moto (comme celle de tout véhicule) s'appuie à la fois sur les informations issues des systèmes sensoriels humains et sur l'anticipation des conséquences des actions de contrôle effectuées. Les simulateurs de conduite pour l'étude des comportements humains de conduite sont construits pour essayer de donner à un conducteur l'illusion de conduire un véhicule réel, en s'appuyant notamment sur la stimulation de ses systèmes sensoriels (si possible multimodale), et ce en respectant autant que faire se peut les attentes du conducteur (voir la section 1.5 consacrée au modèle interne, ainsi que la discussion sur l'implication de l'existence du modèle interne pour la simulation de conduite dans la section 3.1). En fait, dans un contexte de simulation de conduite, le conducteur contrôle « à distance » (téléopère) un modèle de véhicule : ses actions de commande sont détectées par un certain nombre de capteurs intégrés au simulateur, et le comportement du véhicule virtuel est rendu par un certain nombre d'actionneurs.

Les interactions entre conducteur et simulateur de conduite sont rappelées dans la Figure 5.1.

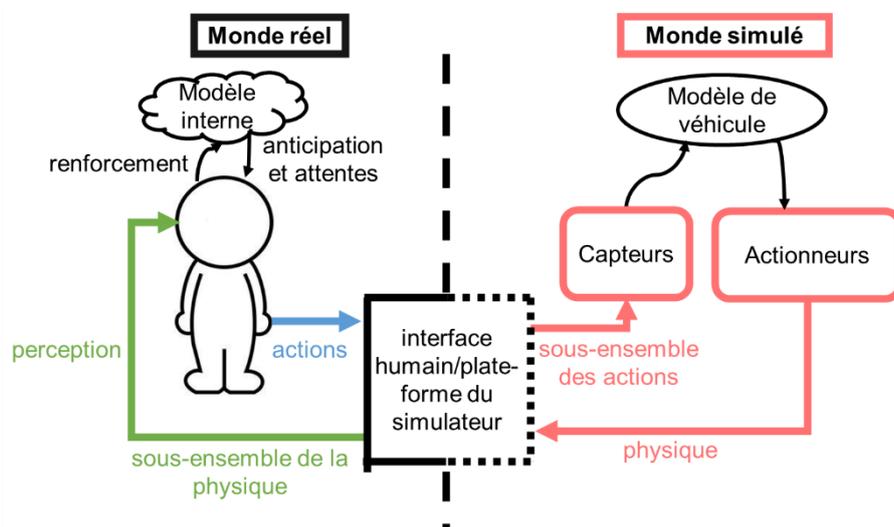


Figure 5.1 Illustration des interactions entre conducteur et simulateur de conduite

On voit que le système est capable de détecter un sous-ensemble des actions de contrôle du conducteur (selon la quantité et la qualité des capteurs intégrés). De la même manière,

le simulateur ne peut restituer qu'un sous-ensemble de la physique simulée par le modèle de véhicule, selon les actionneurs intégrés et selon les phénomènes physiques concernés.

5.1 CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA CONTROLABILITE ET L'ACCEPTABILITE

Notre approche focalisée sur la contrôlabilité a guidé notre travail de conception d'un **système preuve de concept** (*Proof Of Concept*, abrégé *POC*), qui fait l'objet de ce chapitre. Le système en question est un système à **restitution bimodale : visuelle et haptique**. Notre objectif, à travers la conception de ce système POC, était de construire et valider un **guidon de moto motorisé à retour haptique** pour pouvoir l'intégrer dans un second temps à notre simulateur moto.

En amont de cette intégration, nous avons utilisé le système POC en question dans une expérimentation à but double :

1. valider la contrôlabilité du sous-système « guidon à retour haptique » avant son intégration à un système plus complexe (le simulateur moto) ;
2. et, en lien avec notre hypothèse de travail, démontrer l'impact (positif) de l'adéquation ou (négatif) de l'inadéquation de la complexité du modèle de véhicule, d'une part, et de l'architecture d'un simulateur physique, d'autre part, sur la contrôlabilité de l'objet simulé et sur le ressenti général de l'opérateur.

Les résultats de cette expérimentation sont décrits dans le chapitre suivant.

5.2 LA QUESTION DU GUIDON DANS LA CONDUITE MOTO...

Du fait de l'instabilité intrinsèque aux pendules inversés, la conduite d'une moto (qui est un véhicule pendulaire) est plus complexe que celle d'une voiture. Une moto est par nature dynamiquement instable : le conducteur doit stabiliser en permanence son véhicule pour réaliser une trajectoire. C'est pourquoi la contrôlabilité est une notion d'autant plus essentielle pour la construction d'un simulateur de conduite moto. Cependant, les recherches à ce sujet sont limitées. À ce jour, les simulateurs de conduite (de conduite automobile comme de moto), ne sont en fait utilisés que dans des situations où ils sont entièrement contrôlables et acceptables. Cependant, comme mentionné précédemment, cela restreint leurs cas d'utilisation potentiels, en excluant des situations qui présentent pourtant un grand intérêt, par exemple la prise de ronds-points.

5.2.1 ... pour le conducteur

Un conducteur contrôle la trajectoire de sa moto par le biais de deux couples (Cossalter et al., 1999) :

1. le couple de direction, c'est-à-dire le couple appliqué par le conducteur sur la colonne de direction de la moto via le guidon ;
2. et le couple de roulis, résultant de l'inclinaison du corps du conducteur et/ou de l'appui du conducteur sur les repose-pieds.

La combinaison de ces deux couples donne un angle de guidon et de roulis de la moto, lesquels résultent en des forces latérales et gravitationnelles qui, à un point d'équilibre donné de la moto, sont équilibrées par la force la force centripète. C'est ce qui permet au conducteur de stabiliser le véhicule en courbe à un instant donnée.

Pendant la conduite, la colonne de direction subit plusieurs couples :

1. le couple de direction appliqué par le conducteur sur le guidon ;
2. le couple résultant de l'effet gyroscopique de la roue ;
3. le couple résultant du contact pneu/chaussée ;
4. et enfin, le couple indirectement induit par l'action du conducteur sur le roulis de la moto.

La position angulaire de la colonne de direction et du guidon est influencée par l'ensemble de ces couples.

Du point de vue du conducteur, le guidon d'une moto a une double fonction d'action et de perception : le conducteur contrôle la moto en interagissant avec le guidon et le guidon fournit au conducteur un certain nombre de stimuli sensoriels. Le guidon est notamment le siège de stimuli haptiques qui sont essentiels pour le conducteur et influencent significativement son comportement de conduite.

5.2.2 ... et pour le système

Le couple de direction est une entrée du modèle de véhicule implémenté par le simulateur moto, modèle qui calcule notamment la vitesse et l'accélération du guidon, et donc sa nouvelle position. Pour construire un simulateur de conduite moto, il faut donc pouvoir :

1. mesurer le couple de direction appliqué par le conducteur, pour l'utiliser comme entrée du modèle de véhicule ;

2. contrôler le couple résistant, pour la restitution haptique, et l'état (position, vitesse et accélération angulaires) du guidon, en sortie du modèle de véhicule.

Dans le cas des simulateurs de conduite automobile, les couples mis en jeu au niveau du volant ne sont pas situés au centre (Mohellebi et al., 2009) et les variations de la position angulaire du guidon peuvent être importantes (l'amplitude disponible est ± 1.5 tours soit $\pm 540^\circ$). De ce fait, leur mesure et leur contrôle sont relativement simples. Au contraire, pour un simulateur de conduite moto, les variations de la position angulaire du guidon se font autour du centre et sont de faibles amplitudes – de l'ordre du degré – voire de très faibles amplitudes pour des vitesses de véhicule élevées (l'amplitude disponible est $\pm 30^\circ$). Comme en voiture, en déplacement, plus la vitesse de la moto est élevée, plus le couple résistant (du point de vue du conducteur) au niveau du guidon est important.

Cette combinaison entre un couple élevé (jusqu'à 80 Nm) et une amplitude angulaire faible rend la mesure et le contrôle complexes. En effet, la production d'un couple résistant élevé en position centrale est difficile sans générer de vibrations mécaniques (en raison de la fréquence de fonctionnement du contrôleur de puissance matériel), lesquelles nuiraient à la contrôlabilité du système global. En plus de cela, lorsque le conducteur applique un couple sur le guidon de la moto, la colonne de direction peut tourner. Cela signifie que toute mesure de couple ne reflétera pas seulement le couple appliqué par le conducteur, mais aussi la dynamique inhérente de la moto simulée.

Pour la construction d'un simulateur de conduite moto fonctionnant en boucle fermée, il faut pourtant nécessairement mesurer le couple de direction et l'exploiter sans que la position du guidon soit modifiée par l'action du conducteur. La position du guidon doit pouvoir être pilotée par le calcul du modèle de véhicule. Toutes ces étapes doivent pouvoir être réalisées dans un délai acceptable pour la perception haptique du conducteur, d'une part, et pour ne pas impacter négativement la stabilité du modèle de véhicule, d'autre part. À défaut, cela nuirait à la contrôlabilité de la moto simulée.

Au vu de toutes ces considérations, nous pouvons conclure que la conception d'un guidon de moto motorisé pour un simulateur physique est un problème complexe. Cela nécessite de faire un certain nombre de choix technologiques et de compromis, en prenant en compte pour chacun de ces choix le besoin de contrôlabilité du sous-système « guidon » par le conducteur dans la boucle.

Pour ces raisons, notre travail s'est dans un premier temps concentré sur le développement d'un système de guidon motorisé à retour haptique capable d'alimenter le modèle de moto en boucle fermée, en respectant un certain nombre de contraintes sur

les retours sensoriels fournis au conducteur. Ce travail est décrit dans les sections suivantes.

5.3 CONTRAINTES DE CONCEPTION...

5.3.1 ... liées au conducteur

La conduite d'une moto faisant intervenir les systèmes sensoriels humains, dont le rôle précis dans la tâche de conduite dépend du conducteur, décider quels stimuli sensoriels doivent être reproduits par un simulateur de conduite moto et comment est une question complexe. Un point d'entrée pour cette réflexion est le suivant : les systèmes sensoriels humains ont des sensibilités temporelles et fréquentielles inhérentes, ainsi que des limitations physiques et biochimiques qui doivent être prises en compte. Par exemple, la dynamique des récepteurs sensoriels et neuromusculaires, la conduction nerveuse et le temps de traitement des informations par les neurones sont tous responsables d'un délai entre l'instant où un stimulus ou plusieurs stimuli sensoriels sont détectés et l'instant où la réponse à ce ou ces stimuli commence. Pour se rendre compte du type de contraintes à respecter, les délais respectivement introduits par les systèmes sensoriels visuel et haptique sont repris dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Retards sensoriels caractéristiques des systèmes visuel et haptique (extraits des travaux de Nash) (Nash et al., 2016)

Systeme sensoriel	Retard sensoriel caracteristique
Visuel	100 ms – 560 ms
Haptique	Environ 34 ms ou environ 48 ms (selon le récepteur sensoriel mis en jeu)

5.3.2 ... et liées au système

Le système initial du guidon motorisé de notre simulateur de moto, à savoir un moteur à courant continu et un système de transmission par poulie et courroie, était dérivé d'un système de volant à retour d'effort pour simulateur de conduite automobile. Ce système ne pouvait pas garantir un fonctionnement en boucle fermée, tel que décrit précédemment : il ne permettait pas de mesurer le couple appliqué par le conducteur sur le guidon sans que l'état (position, vitesse et accélération angulaires) de celui-ci ne change. Nous avons donc décidé de le remplacer pour résoudre ce problème.

Pour ce faire, nous avons fait le choix de rechercher un actionneur qui soit « difficilement réversible » voire « non réversible » à la main, assurant ainsi la séparation de la dynamique

inhérente du système, d'une part, et de l'action humaine sur le système, d'autre part. Nous avons en outre recherché un actionneur produisant le moins de vibrations possibles. Les servo-moteurs utilisés pour le positionnement des antennes satellitaires sur Terre, en particulier, ont été identifiés comme d'excellents candidats. De plus, ce type de servo-moteur est sans jeu, ce qui est nécessaire pour développer un système à retour haptique.

Le Tableau 5.2 résume les objectifs de conception qui découlent des considérations détaillées dans la section précédente, et les choix technologiques que nous avons faits pour y répondre.

Tableau 5.2 Synthèse des objectifs de conception et des solutions trouvées pour le nouveau système de guidon motorisé

Objectif de conception	Choix de conception
Mesure du couple de direction sans modification de la position du guidon	Servo-moteur « non réversible » (rapport de réduction $R = 160$)
Contrôle à couple élevé sans vibration	
Actionnement...	
... sans jeu	Servo-moteur à réducteur « sans jeu » (HarmonicDrive)
... dans un délai acceptable pour la perception haptique	Fréquence de pilotage adaptée (voir la section 5.7)

Les choix effectués présentent bien sûr des inconvénients inhérents et nécessitent de faire des compromis.

Le premier aspect à considérer est la Compatibilité Électro-Magnétique (abrégé CEM), c'est-à-dire la nécessité d'isoler électriquement tous les capteurs et sous-systèmes, sans quoi il pourrait se produire de nombreux dysfonctionnements (par exemple des dysfonctionnements des écrans utilisés). En effet, pour obtenir les performances spécifiées, le servo-moteur que nous avons sélectionné est alimenté en 380 V triphasé, alors que le moteur à courant continu du système initial était alimenté en basse tension et ne risquait donc pas de poser de problème de CEM.

D'autre part, le type de servo-moteur choisi, c'est-à-dire un servo-moteur destiné au positionnement haute précision, n'est pas fait pour motoriser des systèmes avec une butée mécanique, alors que le guidon d'une moto est naturellement limité par une butée mécanique à gauche et à droite (le guidon est bloqué par le cadre). Dans le cas de notre simulateur moto, la plage de débattement possible pour le guidon est $\pm 30^\circ$. Comme le couple mis en jeu peut être de valeur élevée (jusqu'à 160 Nm en fonctionnement normal

dans le cas du servo-moteur que nous avons intégré), cela présente un risque non négligeable de casse d'un élément du sous-système, en particulier de l'actionneur. Pour éviter cela, nous avons intégré, en plus de sécurités logicielles, un limiteur de couple mécanique.

5.4 ARCHITECTURE

Notre système POC, représenté schématiquement dans la Figure 5.2 (qui reprend les notations de la Figure 5.1), fournit au conducteur :

- des stimuli haptiques à l'aide d'un guidon de moto couplé mécaniquement à un servo-moteur CanisDrive-20A-160-AM-H-SIE, en photo en Figure 5.3 ;
- et un retour visuel à l'aide d'un casque de réalité virtuelle (*Head-Mounted Display*, abrégé *HMD*) HTC Vive Pro.

Comme l'objectif est, à terme, d'intégrer le sous-système de guidon motorisé à retour haptique à un simulateur moto, nous avons conçu ce système POC de sorte que l'opérateur – le conducteur – puisse l'utiliser pour contrôler la trajectoire d'une moto simulée dans une scène virtuelle en s'appuyant sur le retour sensoriel bimodal visuel et haptique qui lui est fourni.

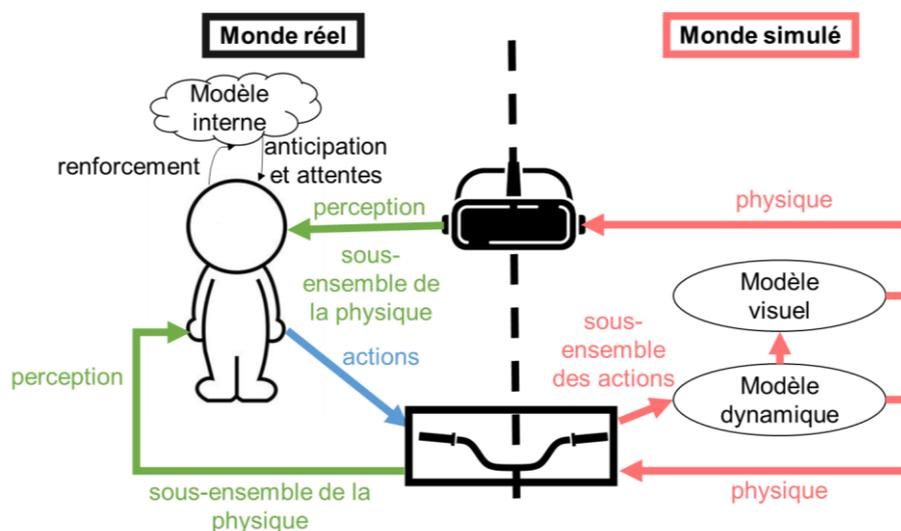


Figure 5.2 Représentation schématique des interactions entre le conducteur et notre système POC

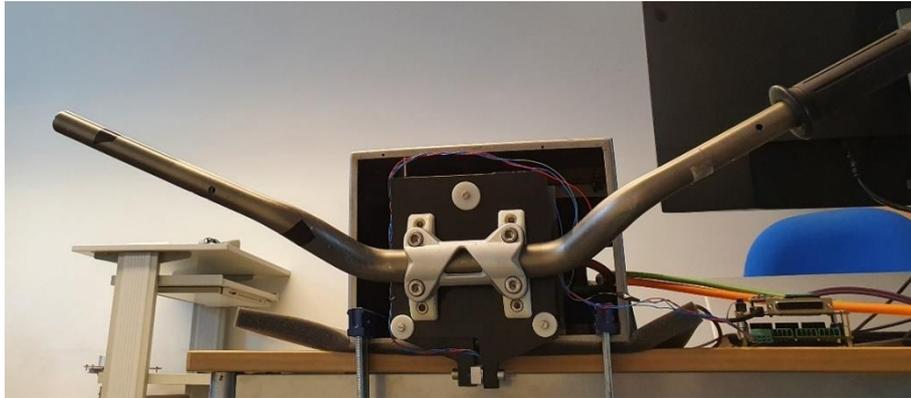


Figure 5.3 Guidon de moto motorisé à retour haptique utilisé dans notre système POC

Notre système POC utilise une architecture distribuée, comme représenté par son diagramme de déploiement dans la Figure 5.4. Il est mis en œuvre à l'aide de :

- un PC intégrant un processeur Intel® Core™ i7-8700 CPU @ 3.20GHz et une carte graphique Nvidia GeForce GTX 1060. Ce PC est responsable du calcul du modèle dynamique de moto. Le modèle dynamique est calculé à une fréquence de 1 kHz. Ce PC est également responsable de la génération des images pour le rendu visuel ;
- une première carte électronique conçue à l'unité de recherche SATIE intégrant un microcontrôleur mbed (LPC1768) et carte DE0-Nano qui est un *FPGA* (abrégié de *Field-Programmable Gate Array*). Cette carte électronique est responsable de la mesure du couple appliqué au guidon par le conducteur ;
- une seconde carte électronique conçue à l'unité de recherche SATIE intégrant un microcontrôleur STM32F446 et une carte DE0-Nano. Cette carte électronique, en conjonction avec un servo-contrôleur YukonDrive-1021-ADO, est responsable de la motorisation du guidon et de la génération du retour haptique.

Cette architecture distribuée permet notamment de réduire la charge de calcul pour le PC et, par conséquent, d'améliorer la stabilité des calculs, de l'échantillonnage et des fréquences de transmission (qui sont imposées par les contraintes que nous détaillons dans ce chapitre). Des instabilités de fréquence auraient un impact négatif sur la contrôlabilité du simulateur moto, à éviter vu notre hypothèse.

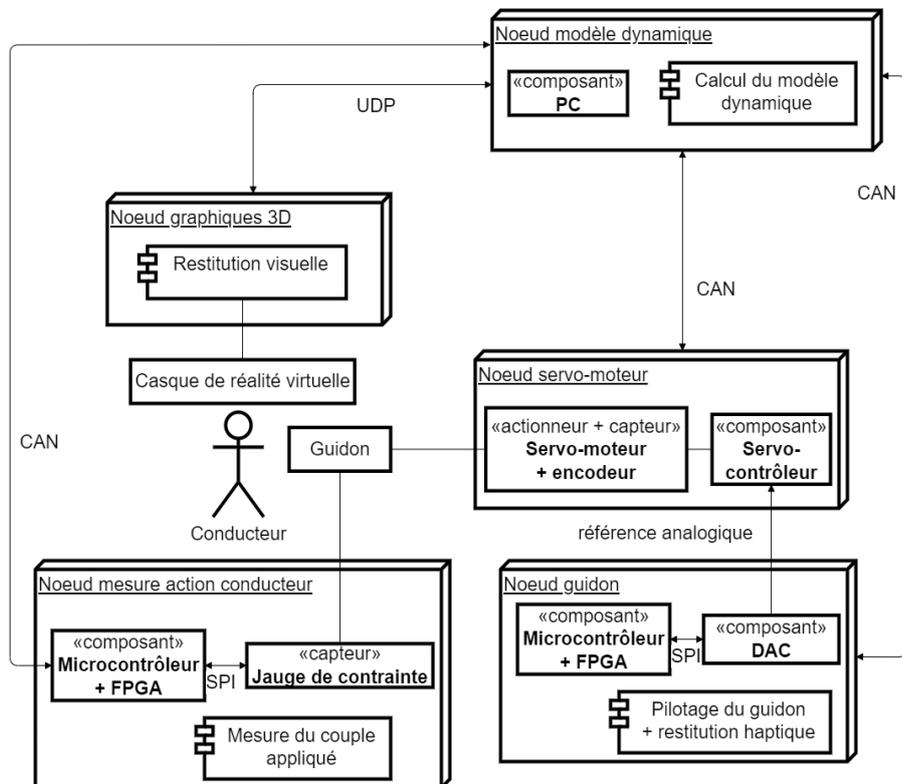


Figure 5.4 Diagramme de déploiement de notre système POC

Le servo-moteur et le servo-contrôleur sont isolés avec une attention spéciale de sorte à éviter les interférences électromagnétiques entre eux et les autres parties du système, notamment le casque de réalité virtuelle.

5.5 MESURE DE L'ACTION DU CONDUCTEUR

En simulation de conduite moto, comme indiqué précédemment, le conducteur ne conduit pas une moto réelle, mais téléopère un modèle de moto en interagissant avec un système physique. En particulier, dans le cas de notre système POC, le conducteur contrôle la trajectoire de la moto simulée en agissant sur le guidon.

Le couple appliqué sur le guidon par le conducteur / couple résultant sur la colonne de direction est une entrée du modèle de moto et doit être mesuré par le système. Du fait des choix de conception faits, le couple appliqué par le conducteur sur le guidon peut ainsi être mesuré au moyen d'une jauge de contrainte (mise en évidence sur la Figure 5.5).

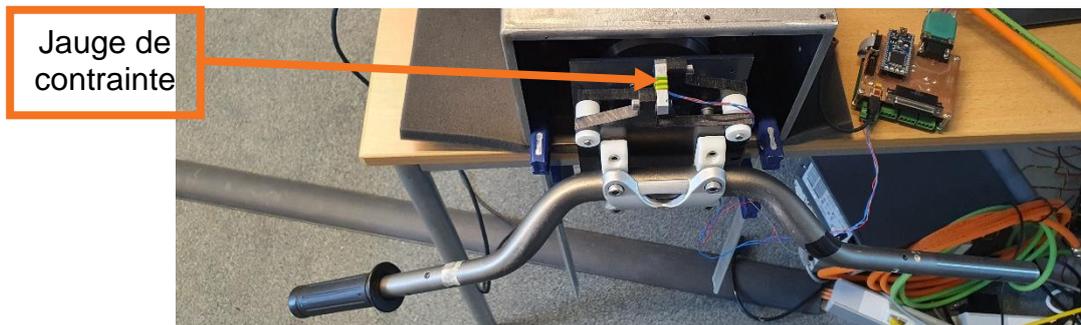


Figure 5.5 Localisation de la jauge de contrainte utilisée pour mesurer le couple appliqué par le conducteur sur le guidon

La carte d'acquisition du couple appliqué a été conçue à l'unité de recherche SATIE, initialement pour d'autres travaux de recherche, de sorte que le FPGA intégré puisse échantillonner les mesures d'un à quatre capteurs par liaisons SPI (abrégé de *Serial Peripheral Interface*). Dans notre application, un seul canal d'acquisition est utilisé. Nous avons choisi d'échantillonner le couple appliqué par le conducteur sur le guidon à une fréquence de 500 Hz dans le cas de notre système POC.

Les mesures échantillonnées sont transmises à la demande au microcontrôleur intégré, toujours par liaison SPI. Les deux blocs SPI implémentés sur le FPGA utilisent une fréquence d'horloge (notée *SCLK* pour *Serial Clock*) de 10 MHz pour le transfert de données.

Le microcontrôleur filtre les mesures en utilisant un filtre à Réponse Impulsionnelle Infinie (RII), plus précisément un filtre numérique Butterworth passe-bas d'ordre 2 qui permet d'atténuer le bruit de mesure. Les mesures filtrées sont ensuite retransmises via un bus CAN (abrégé de *Controller Area Network*), avec une vitesse de bus CAN de 1 Mbits/s.

5.6 RESTITUTION VISUELLE DANS NOTRE SYSTEME PREUVE DE CONCEPT : CHOIX DE CONCEPTION

La scène visuelle projetée dans le *HMD* est calculée en temps réel par un générateur de graphiques 3D, le moteur Unity3D avec le *plugin* OpenXR. Les sorties pertinentes du modèle (par exemple, la position, la vitesse, l'accélération) sont envoyées par le PC à ce moteur graphique en utilisant le protocole UDP (abrégé de *User Datagram Protocol*) et à une fréquence de 90 Hz. L'utilisation d'un *HMD* permet également de mettre en œuvre une restitution auditive, mais ce n'est pas l'objet de ces travaux.

5.6.1 Fréquence de rafraîchissement de l'image

Pour le rendu visuel, la première contrainte temporelle à prendre en compte est la fréquence de rafraîchissement de l'image. Une fréquence de rafraîchissement suffisante et constante est nécessaire pour que le conducteur ait l'impression d'un mouvement visuel continu et fluide. On définit généralement 25 images par seconde (*Frames Per Second*, abrégé *FPS*) comme la fréquence de rafraîchissement minimale acceptable pour garantir cette impression. Cependant, dans le contexte de la simulation de conduite, la scène visuelle peut contenir des véhicules se déplaçant à grande vitesse dans l'environnement du conducteur, ou devoir lui donner l'illusion de se déplacer à grande vitesse soi-même, ce qui nécessite une fréquence de rafraîchissement plus élevée pour que le mouvement paraisse continu et fluide. En plus de cela, une fréquence de rafraîchissement variable induit un problème de scintillement de l'image, ainsi qu'une instabilité générale de l'environnement virtuel lors de l'utilisation d'un *HMD*. Ces effets visuels sont perçus comme des mouvements erratiques et/ou oscillants de la moto simulée du point de vue du conducteur. Dans notre système, le retour visuel, c'est-à-dire les stimuli visuels disponibles pour le conducteur, est généré par le moteur graphique à une fréquence de rafraîchissement constante de 90 FPS.

5.6.2 Retard sensoriel et délai de transport introduit par le système

Comme présenté dans le Tableau 5.1, le système visuel est caractérisé par un retard sensoriel entre la perception d'un changement visuel dans l'environnement et la réponse à ce changement allant de 100 ms à 560 ms (Nash et al., 2016).

Le système en lui-même est lui aussi à l'origine d'un délai qui est appelé délai de transport, cette fois-ci entre une action de contrôle-commande effectuée par le conducteur et la réponse du système à cette action. Dans le cas de notre système POC, l'action de contrôle-commande est une action sur le guidon. La réponse du système à cette action est perçue à deux niveaux : un changement dans l'environnement détecté par la vision et un changement de l'état du guidon détecté par le toucher.

Les délais de transport maximaux acceptables dépendent du système, de la tâche, du type de perception considéré, et de la personne (Attig et al., 2017). Lorsque le délai de transport introduit par un système est supérieur à un délai de transport acceptable, le système devient plus difficile à contrôler, voire n'est plus contrôlable. Dans ce cas, le système n'est plus acceptable pour le conducteur, ce qui peut provoquer un sentiment de malaise pour celui-ci.

En ce qui concerne la restitution visuelle, le conducteur peut détecter et être gêné (subjectivement et objectivement) par un délai de transport d'ordre de grandeur inférieur au retard sensoriel caractéristique de la vision (soit inférieur à 100 ms). Pour une tâche de conduite simulée, qui est une tâche à temps critique, la latence visuelle maximale acceptable rapportée dans la littérature est de 50 ms (Frank et al., 1988; Padmos & Milders, 1992; Pinto et al., 2008). Comme indiqué précédemment, dans notre système POC, la simulation de l'environnement (en réalité virtuelle) visuelle est réalisée avec une fréquence de rafraîchissement fixée à 90 FPS. En supposant que tous les calculs sont effectués entre chaque nouvelle image, cette fréquence de rafraîchissement introduit à elle seule une latence de 11 ms. Il faut aussi prendre en compte d'autres sources logicielles et matérielles de retard de transport. Pour le casque HTC Vive Pro utilisé conjointement avec le moteur graphique Unity3D, Le Chénéchal et Chatel-Goldman ont trouvé un délai de transport moyen de 31.33 ms (Le Chénéchal & Chatel-Goldman, 2018). Il s'agit d'une latence visuelle acceptable pour une tâche de conduite simulée.

Cependant, ces choix de conception ne sont pas suffisants. Dans notre système POC, le retour d'information fourni au conducteur est bimodal : visuel et tactile. Cela a un impact sur les latences acceptables pour le retour visuel et haptique. Pour que le système complet respecte les contraintes temporelles fixées, il faut que les deux sous-systèmes soient cohérents temporellement et que les délais de transport qu'ils introduisent soient tous les deux acceptables.

5.6.3 Conclusion sur la restitution visuelle

La conception du sous-système de restitution visuelle de notre système POC prend en compte les contraintes physiologiques spécifiques à la vision dans le contexte particulier de l'accomplissement d'une tâche de conduite simulée.

Cette stratégie de conception permet d'éviter des problèmes de scintillement et/ou de mouvements incontrôlés de la scène visuelle et par conséquent de garantir un meilleur degré de contrôlabilité de la moto simulée.

5.7 RESTITUTION HAPTIQUE DANS NOTRE SYSTEME PREUVE DE CONCEPT : CHOIX DE CONCEPTION

La perception haptique est divisée en deux sous-modalités sensorielles dépendantes (Fuchs et al., 2006; Reed & Ziat, 2018) :

- la kinesthésie, c'est-à-dire la perception du mouvement propre du corps ;

- la perception tactile, ou sens du toucher.

Nous avons expliqué dans un chapitre précédent qu'il existe plusieurs types de mécanorécepteurs, qui sont les récepteurs sensoriels permettant la perception kinesthésique et tactile. Chacun de ces types de mécanorécepteurs est sensible à des stimuli spécifiques de différentes fréquences. La conduite d'un véhicule à l'aide d'un volant ou d'un guidon stimule trois types de mécanorécepteurs (parmi tous les types existants), dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 5.3.

Tableau 5.3 Caractéristiques (types de stimuli détectés et sensibilité fréquentielle) des mécanorécepteurs pertinents pour la tâche de conduite (extraits des travaux de Hale & Stanney) (Hale & Stanney, 2004)

Type de mécanorécepteurs	Types de stimuli (pertinents pour une tâche de conduite) détectés	Sensibilité fréquentielle
Corpuscules de Vater-Pacini	Vibration, accélération	[100 Hz, 1 kHz]
Corpuscules de Ruffini	Force latérale, direction du mouvement, force statique	[0.4 Hz, 100 Hz]
Corpuscules de Meissner	Vélocité, contrôle de la préhension	[2 Hz, 40 Hz]

5.7.1 Sensibilité fréquentielle

Les sensibilités fréquentielles respectives des mécanorécepteurs impliqués dans la perception haptique imposent des contraintes de conception pour les paramètres en fréquence du sous-système de restitution haptique de notre système POC.

Nous avons choisi d'échantillonner le couple exercé par le conducteur sur le guidon à une fréquence de 500 Hz. Cette fréquence est cohérente avec les contraintes fréquentielles présentées. Elle est également conforme aux règles de contrôle-commande de la téléopération qui spécifient une fréquence de rafraîchissement haptique comprise entre 500 Hz et 1 kHz afin d'assurer la stabilité et la transparence de l'interaction haptique. Cette fréquence de boucle garantit la contrôlabilité et améliore par conséquent l'acceptabilité du « du système simulateur » et donc de la moto simulée.

La carte de pilotage du guidon a été spécialement conçue pour cette application, de sorte à pouvoir implémenter un décodage direct des signaux sinus/cosinus de l'encodeur en utilisant le FPGA intégré à la carte. En effet, tous les autres moyens d'acquisition nativement disponibles (protocole EnDat 2.1/01 sur une liaison série RS 485, ou bus CAN

local avec CANopen) sont trop lents pour garantir un comportement temps réel, c'est-à-dire une fréquence de boucle de 200 Hz ou plus pour la perception haptique.

Comme pour la carte de mesure du couple appliqué par le conducteur, le FPGA et le microcontrôleur intégrés à cette carte communiquent par liaison SPI (avec une fréquence d'horloge SCLK de 10 MHz).

Le microcontrôleur intégré retransmet les données encodeur, c'est-à-dire la position et la vitesse angulaires du servo-moteur (et donc du guidon) sur un bus CAN à une période de 1ms. Ces informations sont utilisées comme entrées du modèle dynamique de moto. Cette fréquence d'échantillonnage et de transmission est également conforme aux contraintes fréquentielles de la boucle haptique établies dans ce chapitre.

5.7.2 Pilotage du guidon motorisé

La vitesse de notre actionneur à retour haptique est contrôlée par un contrôleur Proportionnel Intégral (abrégé PI). Cependant, dans notre implémentation, la sortie vitesse du modèle n'est pas appliquée directement comme référence de vitesse mais est d'abord corrigée en utilisant l'erreur de position courante. Cette double commande position-vitesse évite une dérive de la position qui serait due à une erreur de suivi en vitesse incrémentale et à l'intégration numérique. Le schéma fonctionnel de la commande position-vitesse est présenté à la Figure 5.6. Pour plus de clarté, les entrées du modèle ne sont pas représentées de manière exhaustive, mais elles ont été décrites dans le texte.

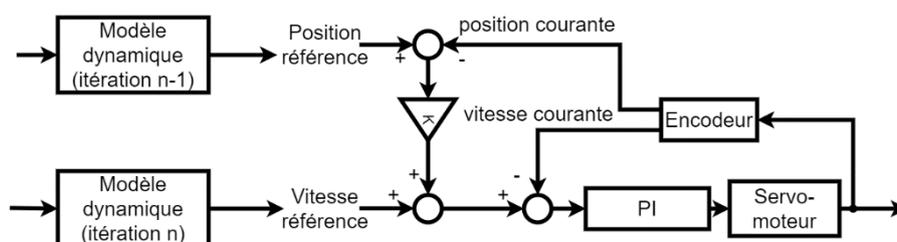


Figure 5.6 Représentation sous forme de schéma-bloc de la commande position-vitesse du servo-moteur

5.7.3 Retard sensoriel et délai de transport introduit par le système

Comme pour la vision, la perception haptique permet un délai de transport maximal acceptable entre le moment où le conducteur essaie de tourner le guidon et celui où le guidon tourne effectivement. Même si les messages nerveux ont une plus grande distance à parcourir entre les mains et le cerveau qu'entre les yeux et le cerveau, les délais caractéristiques de la perception haptique sont significativement plus courts que les délais

caractéristiques de la vision (comme en témoigne le Tableau 5.1 ; voir également (Cameron et al., 2014; Crevecœur et al., 2016)). Le délai haptique maximal acceptable varie significativement en fonction de la tâche, du système et de la personne (Kaber & Zhang, 2011). Notre objectif pour la construction du système POC décrit dans ce chapitre est la minimisation de la latence haptique introduite.

La communication par un bus CAN introduit un retard bien connu qui correspond à la durée d'une trame CAN. La durée maximale d'une trame CAN standard est d'environ 134 μ s (pour une trame de données de 8 octets). Le processus d'arbitrage CAN ajoute un retard additionnel qui est difficile à quantifier (ce retard dépend des autres trames qui sont transmises sur le bus). De plus, la communication avec le servo-contrôleur dédié se fait sur un bus CAN local avec le protocole CANopen. Cependant, ce protocole est une sous-couche verbeuse et lente (pour notre application), ce qui pose un problème à la fois pour le pilotage du système et pour la période à laquelle les données du servo-moteur peuvent être disponibles. Pour pallier ce problème, nous avons fait le choix d'utiliser une référence analogique ± 10 V pour la commande du servo-moteur, plutôt qu'une référence de vitesse envoyée sur le bus CAN local. La vitesse est ainsi pilotée tout en minimisant le délai de transport introduit dans la commande du système, qui affecte la latence haptique et visuelle.

5.7.4 Conclusion sur la restitution haptique

Nous avons conçu le sous-système de restitution haptique de notre système POC en tenant compte des contraintes physiologiques spécifiques à la perception haptique, telles que les sensibilités fréquentielles des récepteurs sensoriels haptiques et le besoin de minimiser la latence haptique.

Ainsi, notre système POC fournit au conducteur un retour haptique au niveau d'un guidon de moto conçu pour être « de bonne qualité ». C'était l'objectif principal du travail présenté dans ce chapitre : concevoir un système de guidon motorisé à retour haptique qui soit contrôlable pour pouvoir l'intégrer à un simulateur de conduite moto.

5.8 CONCLUSION PARTIELLE

Notre hypothèse de travail est que le mal du simulateur provient d'une inadéquation entre :

- la complexité du modèle de véhicule implémenté, d'une part ;
- et la fidélité des retours sensoriels reproduits, qui est directement limitée par l'architecture matérielle et logicielle du simulateur, d'autre part.

Pour pouvoir tester notre hypothèse, nous avons conçu un système preuve de concept à restitution sensorielle bimodale (visuo-haptique) en tâchant de prendre en compte les contraintes spécifiques imposées par la mobilisation des systèmes sensoriels humains. Notre stratégie de conception, détaillée dans ce chapitre, doit permettre de garantir la contrôlabilité d'un simulateur de conduite (même s'il est plus complexe que notre système POC).

Nos travaux portent en particulier sur un simulateur de conduite moto, et nous nous sommes dans ce cadre focalisés (au moins dans un premier temps) sur la qualité du retour haptique au niveau du guidon. En effet, ce retour affecte significativement la contrôlabilité du simulateur et n'est pas souvent pris en compte comme il le devrait.

Le système preuve de concept de guidon motorisé à retour haptique décrit dans ce chapitre a été développé dans l'objectif d'améliorer la contrôlabilité (et par voie de conséquence l'acceptabilité) du simulateur de conduite moto auquel il doit être intégré. Mécaniquement (et parce que nous l'avons choisi ainsi), il est difficilement réversible ce qui limite sa réactivité. Il apparaît donc nécessaire de valider expérimentalement le compromis fait entre accessibilité de la mesure et réactivité en vérifiant que cette réactivité reste suffisante – acceptable – pour les conducteurs.

En amont d'expérimentations sur simulateur de conduite « complet », nous avons imaginé une expérimentation pilote permettant de :

- valider le bon fonctionnement de système POC, en particulier la contrôlabilité du guidon motorisé à retour haptique ;
- et mettre en évidence l'importance de l'adéquation entre le modèle dynamique et le retour visuel pour une tâche de contrôle « simple » : la régulation des oscillations d'un objet simulé.

6 EXPERIMENTATION N°1 : ADEQUATION MODELES / STIMULI SENSORIELS : QUEL IMPACT SUR LA CONTROLABILITE DES SYSTEMES ?

Le **mal du simulateur** est souvent expliqué par l'existence d'un conflit neurosensoriel ou à une instabilité posturale prolongée. Notre hypothèse à ce sujet est que le mal du simulateur, dans le contexte de la simulation de conduite, est une conséquence négative de la **non-contrôlabilité** (ou d'un degré de contrôlabilité faible) du véhicule virtuel, qui entraîne pour le conducteur des difficultés de contrôle de son mouvement propre dans la scène virtuelle, ainsi qu'un sentiment d'anxiété, d'inconfort et/ou de malaise. À notre sens, la non-contrôlabilité d'un simulateur de conduite résulte d'une **inadéquation** entre :

- la **complexité du modèle de véhicule implémenté**, d'une part ;
- et la **complexité de l'architecture matérielle et logicielle du simulateur (induisant des latences ou des rendus non acceptables)**, d'autre part.

L'architecture du simulateur limite en effet, les stimuli sensoriels (en termes de quantité et de qualité) qui peuvent être fournis au conducteur. Cette limitation est problématique car le conducteur a nécessairement des attentes à ce sujet qui découlent de son expérience de conduite antérieure.

Nous avons conçu et mené une **expérimentation intra-participants** utilisant un système **preuve de concept** pour tester cette hypothèse. Cette expérimentation, que nous décrivons dans ce chapitre, consistait en la régulation des oscillations d'un pendule simulé à l'aide d'un actionneur à retour haptique (pour le contrôle de l'objet simulé et pour la restitution haptique) et d'un casque de réalité virtuelle (pour la restitution visuelle). Les participants devaient réaliser cette tâche de régulation :

1. pour des situations de cohérence entre le comportement dynamique du pendule simulé et le retour visuel produit ;
2. et pour des situations où nous avons volontairement rendu cela incohérent.

Nous avons produit cette incohérence en utilisant un visuel de boule pleine ou creuse (lourde ou légère) et un modèle de déplacement cohérent avec son poids ou non (par exemple : un visuel de boule pleine, donc lourde, avec un modèle de déplacement d'une boule creuse donc légère).

Les résultats de cette expérimentation mettent en évidence plusieurs effets significatifs et supportent en ce sens notre hypothèse :

1. l'**entraînement** des participants a un effet significatif sur le **degré de contrôle** exercé sur l'objet simulé et leurs **performances** dans la tâche de régulation ;
2. et l'**incongruence** entre modèle dynamique et retour visuel modifie le **degré de contrôle** et les **performances**, ainsi que le **ressenti** (le malaise) des participants.

6.1 MOTIVATIONS

Nous avons dans un premier temps cherché à démontrer l'importance de la cohérence entre le modèle dynamique et le retour visuel pour une tâche de contrôle moteur « simple » consistant à réguler les oscillations d'un objet simulé. Dans ce but, cette expérimentation compare les résultats en termes de degré de contrôle exercé par un opérateur pour une telle tâche :

1. d'une part, lorsque le comportement dynamique de l'objet simulé, restitué à l'aide d'un actionneur à retour haptique, et le retour visuel fourni par le simulateur sont cohérents ;
2. et, d'autre part, lorsqu'ils ne le sont pas.

Selon notre hypothèse, l'adéquation du modèle et des stimuli sensoriels est cruciale pour la contrôlabilité d'un objet simulé. Nous avons fait le choix délibéré de nous concentrer en première approche sur une tâche de contrôle moteur simple, sans mouvement propre, de sorte à pouvoir mettre en évidence l'importance de l'adéquation entre modèle et stimuli sensoriels pour le contrôle d'un objet simulé (au sens large). Ce résultat pourra ensuite être transposé à la simulation de conduite, c'est-à-dire au contrôle d'un véhicule simulé (un objet simulé complexe).

6.2 METHODOLOGIE

6.2.1 Participants

Pour cette expérimentation, les participants ont été recrutés au moyen d'annonces sur les listes de diffusion de l'unité de recherche SATIE.

Vingt-quatre participants (5 femmes et 19 hommes) âgés de 23 à 64 ans (d'âge moyen $M = 40$ ans, écart-type $ET = 13,9$ ans) ont pris part à cette expérimentation, bénévolement. Tous avaient une vue normale ou corrigée à la normale (6 / 10). Au regard de la tâche à

réaliser, ces participants ont été recrutés sans chercher à savoir s'ils étaient titulaires ou non du permis moto (catégorie A) ou auto (catégorie B).

Les données relatives à quatre participants (1 femme et 3 hommes), qui n'ont pas respecté les instructions données concernant la tâche à réaliser, ont été exclues des analyses que nous présentons dans ce chapitre.

6.2.2 Dispositif expérimental

L'expérimentation a été réalisée à l'aide d'un actionneur à retour haptique, pour le contrôle de l'objet simulé et la restitution des stimuli sensoriels relevant du sens du toucher, et d'un casque de réalité virtuelle (*Head-Mounted Display*, abrégé *HMD*), pour la restitution visuelle, comme le montre la Figure 6.1. Ce système est le système POC que nous avons décrit dans le chapitre précédent.

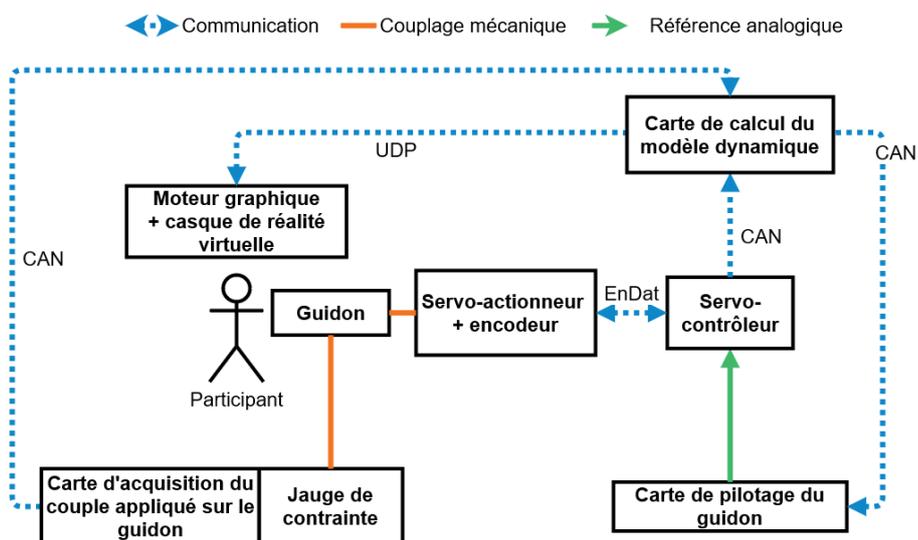


Figure 6.1 Représentation schématique du système utilisé pour l'expérimentation pilote

L'actionneur à retour haptique utilisé consistait en un guidon de moto couplé mécaniquement à un servo-moteur CanisDrive-20A-160-AM-H-SIE (voir Figure 6.2). Le HMD était un casque HTC Vive Pro, de champ de vision FOV = 110° et avec une résolution de 2880 x 1600 pixels. Le taux de rafraîchissement pour la restitution visuelle était fixé à 90 FPS. Au début de l'expérimentation, les participants étaient invités à mettre le HMD et à l'ajuster à leur tête. S'ils portaient des lunettes correctrices, ils devaient les porter à l'intérieur du HMD. Il leur était également demandé d'ajuster le HMD à leur vision, c'est-à-dire de paramétrer leur écart pupillaire (*InterPupillary Distance*, abrégé *IPD*). Pour

effectuer ces réglages, les participants devaient s'appuyer sur le guide de l'utilisateur du HMD.

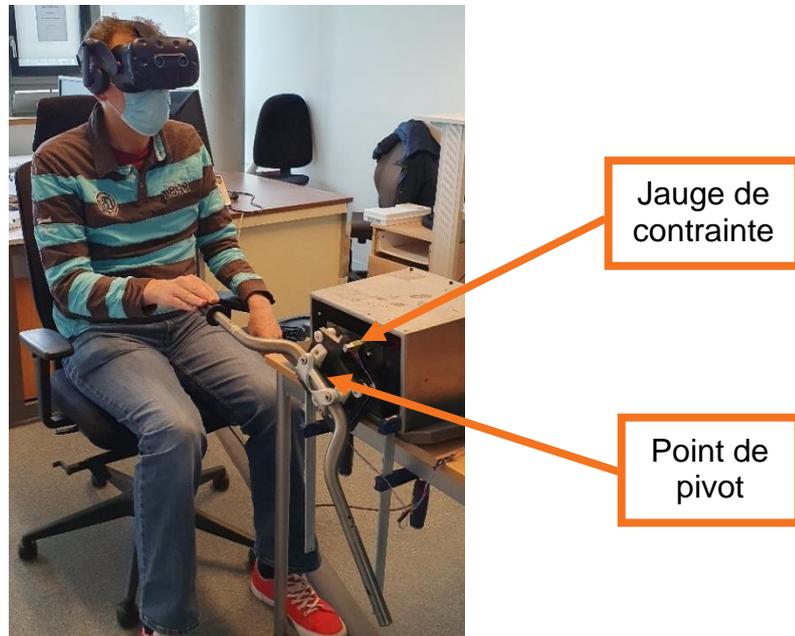


Figure 6.2 Participant pendant l'expérimentation pilote

6.2.3 Tâche et plan expérimental

La tâche à réaliser par les participants était de réguler les oscillations d'un objet simulé, à savoir un pendule. Le modèle dynamique de l'objet était celui d'un pendule simple amorti, représenté schématiquement par la Figure 6.3.

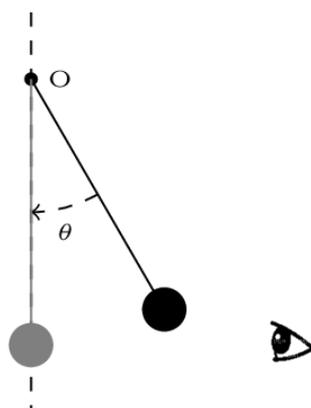


Figure 6.3 Schéma du pendule simple, où la position d'équilibre ($\theta = 0^\circ$) est représentée en gris et le sens de l'observation pour le participant est représenté par l'œil

Deux modèles dynamiques différents étaient utilisés pour l'étude : celui d'un pendule lourd (noté *H* pour *Heavy*) et celui d'un pendule léger (noté *L* pour *Léger*), avec des masses différentes et un coefficient d'amortissement dépendant de la masse.

Le pendule était représenté visuellement par deux objets différents : l'un, un objet d'aspect lourd (texture pleine) et l'autre un objet d'aspect léger (texture creuse). La Figure 6.4 montre les visuels correspondants. Du point de vue du participant, l'objet simulé se déplaçait dans son plan sagittal, avec un unique degré de liberté, le tangage.

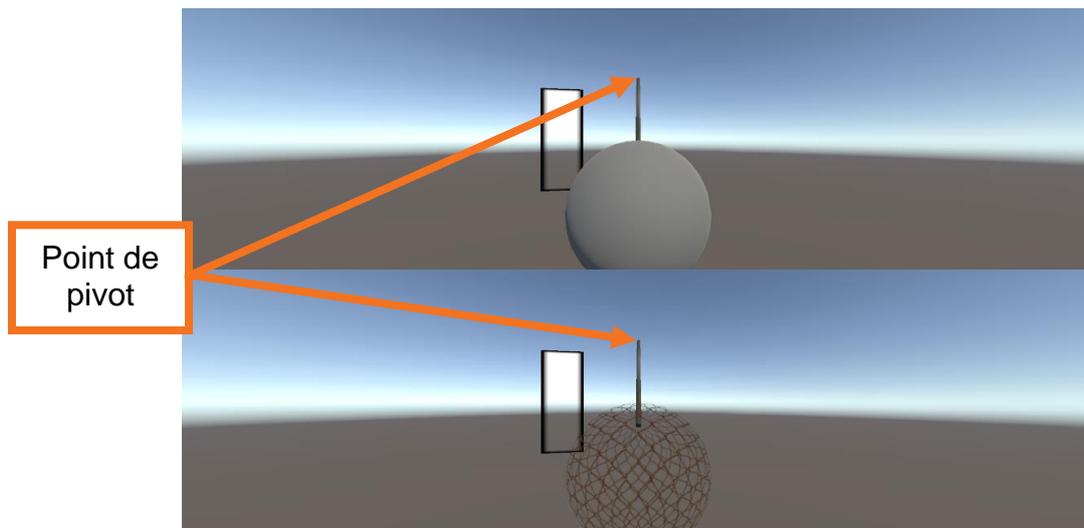


Figure 6.4 Représentation visuel du pendule lourd *H* (en haut) et léger *L* (en bas) dans une position angulaire proche du participant

Le mouvement du guidon de moto, restituant les stimuli haptiques, était contrôlé en utilisant la position et la vitesse angulaire du pendule simulé (qui sont des sorties du modèle dynamique de pendule) comme références de position et de vitesse dans la boucle de contrôle du guidon motorisé.

Au début de l'expérimentation, le pendule virtuel était dans un état initial stable, c'est-à-dire à sa position angulaire d'équilibre (voir la Figure 6.3). Les participants étaient invités à le déstabiliser en le poussant pour débiter la session. L'objectif pour les participants était ensuite de réguler l'amplitude des oscillations du pendule à la manière des oscillations d'une balançoire, donc en le repoussant lorsqu'il se trouvait devant eux, par une action sur la poignée du guidon à retour haptique (voir la Figure 6.2 qui montre un participant en train d'effectuer cette action). Le couple appliqué par les participants sur le guidon était mesuré à l'aide d'une jauge de contrainte et utilisé pour déterminer la force d'entraînement du pendule simulé.

Les oscillations du pendule étaient considérées comme régulées, c'est-à-dire que les participants accomplissaient la tâche qui leur était donnée, lorsque la position angulaire maximale du pendule, c'est-à-dire la position la plus éloignée du participant atteinte par pendule avant de changer de sens de balancement et de revenir vers le participant, était maintenue dans l'intervalle

$$I_{cible} = [80^\circ \pm 5^\circ] = [75^\circ, 85^\circ]$$

La Figure 6.5 résume les différentes plages angulaires de fonctionnement.

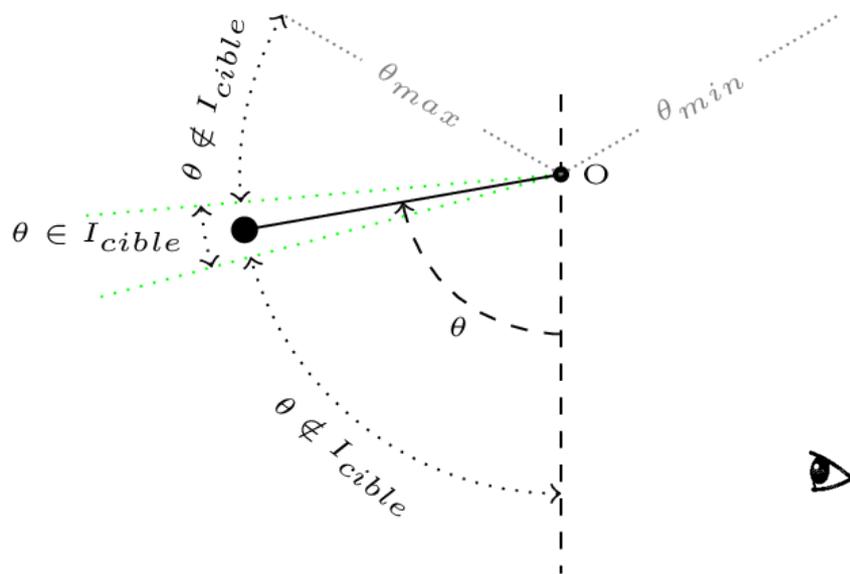


Figure 6.5 Plages angulaires d'intérêt du pendule simple pour l'expérimentation pilote : l'intervalle I_{cible} que les participants devaient viser est délimité en vert ; la plage de débattement possible est délimitée en gris

La scène visuelle, en plus du pendule, incluait un *bargraphe* dont l'axe vertical représentait la position angulaire actuelle du pendule, limitée (pour des raisons mécaniques) à l'intervalle $[\theta_{min}, \theta_{max}] = [-120^\circ, 120^\circ]$. La couleur de ce *bargraphe* fournissait aux participants un retour sur leurs performances (voir la Figure 6.6 pour des exemples), au moyen d'un gradient de couleur allant :

- du blanc, lorsque la position maximale atteinte était inférieure à 75° (en dessous de l'intervalle désiré) ;
- au vert, lorsque la position maximale atteinte était comprise entre 75° et 85° (dans l'intervalle désiré) ;

- au jaune puis au rouge, lorsque la position maximale atteinte était supérieure à 85° (au-dessus de l'intervalle désiré).

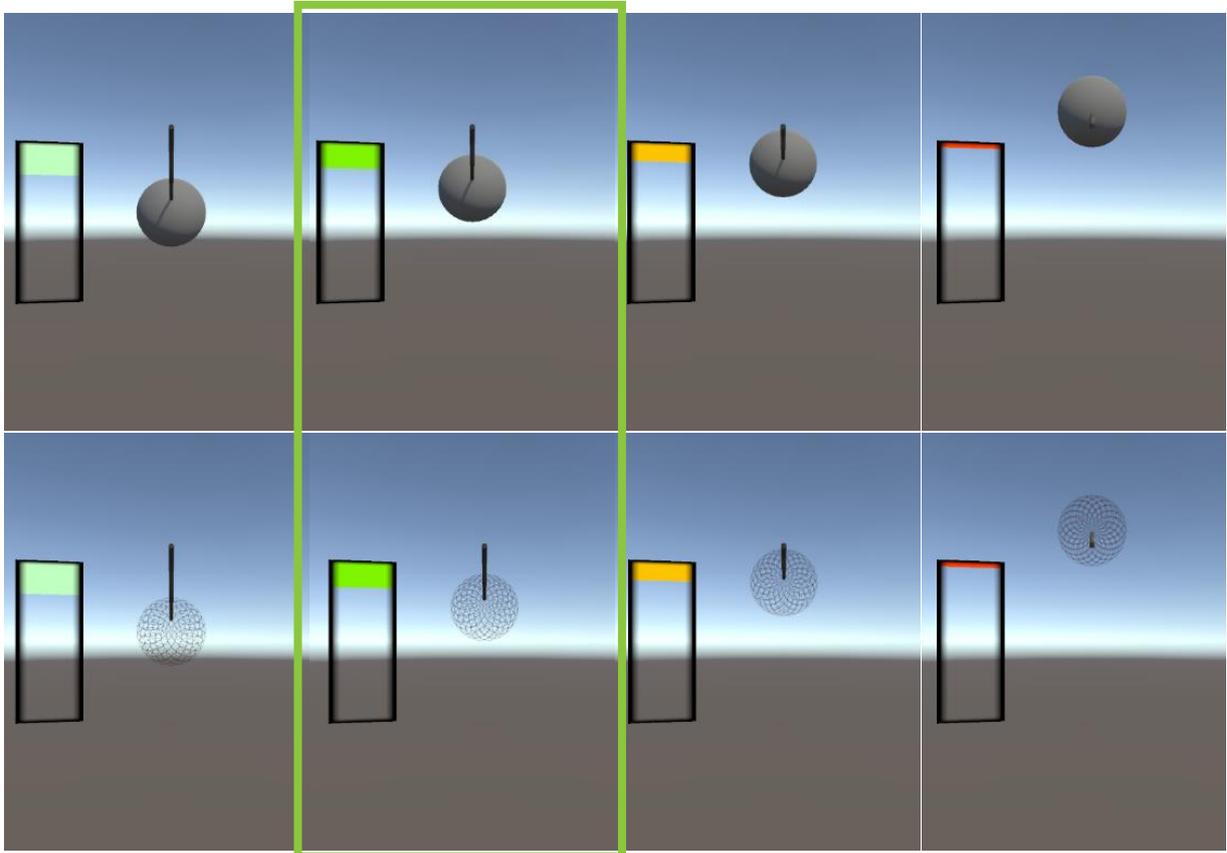


Figure 6.6 Exemples de la scène visuelle pendant l'expérimentation pilote : l'encadré vert correspond au cas où le participant a accompli sa tâche pour l'oscillation en cours – la position maximale atteinte par le pendule est dans l'intervalle désiré I_{cible}

Notre expérimentation comportait quatre variantes expérimentales :

1. une variante **congruente** où le modèle dynamique et le retour visuel étaient tous les deux celui d'un objet **lourd**. Cette variante est notée variante lourd/lourd (*HH*) ;
2. une seconde variante **congruente** où le modèle dynamique et le retour visuel étaient tous les deux celui d'un objet léger. Cette variante est notée variante léger/léger (*LL*) ;
3. une variante **incongruente** où le modèle dynamique était celui d'un objet léger mais avec le visuel d'un objet lourd. Cette variante est notée variante lourd/léger (*HL*) ;

4. une seconde variante **incongruente** où le modèle dynamique était celui d'un objet lourd mais avec le visuel d'un objet léger. Cette variante est notée variante léger/lourd (*LH*).

Le plan expérimental de notre expérimentation, tel que décrit, était intra-participants, c'est-à-dire que les participants étaient confrontés à toutes les combinaisons de modalité de modèle dynamique et de retour visuel.

Ce plan expérimental peut se noter :

Modèle dynamique de pendule (lourd, léger) x Visuel de pendule (lourd, léger)

Le plan expérimental est repris dans le Tableau 6.1 qui synthétise la configuration du système pour les 4 variantes expérimentales.

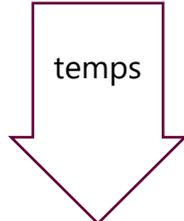
Tableau 6.1 Synthèse des variantes expérimentales de l'expérimentation pilote

Variante expérimentale	Visuel		Modèle dynamique	
	Objet lourd	Objet léger	Pendule lourd	Pendule léger
Lourd/lourd (HH)	x		x	
Léger/léger (LL)		x		x
Lourd/léger (HL)	x			x
Léger/lourd (LH)		x	x	

6.2.4 Procédure

Nous avons d'abord expliqué aux participants la tâche qu'ils devaient accomplir. Puis, les participants ont été entraînés à utiliser les deux variantes cohérentes. Cette première phase était une phase de familiarisation. Chaque participant a ensuite été confronté aux deux variantes incongruentes, avec une seconde exposition à la variante congruente lourd/lourd (*HH*) insérée entre les deux. Le but de cette seconde exposition était de vérifier que l'entraînement avait un effet positif sur le degré de contrôle et les performances du participant pour une variante déjà rencontrée. Pour ce faire, la variabilité de ces deux aspects avant et après l'entraînement a été comparée au moment de l'analyse des données. Un exemple d'ordre d'exposition, résumant cette procédure, est donné dans le Tableau 6.2.

Tableau 6.2 Exemple d'ordre d'exposition pour l'expérimentation pilote (N.B. : la variante répétée (en orange) dans la phase de mesures était toujours la variante congruente lourd/lourd)



Phase		Variante	Visuel		Modèle dynamique	
			lourd	léger	lourd	léger
Familiarisation		HH	x		x	
		LL		x		x
Mesures	Incongruence	HL	x			x
	Répétition	HH	x		x	
	Incongruence	LH		x	x	

La phase de familiarisation pouvait durer jusqu'à 15 oscillations pour chaque variante mais se terminait après 10 à 14 oscillations si le participant réussissait à réguler l'amplitude des oscillations pendant au moins 5 oscillations successives. La phase de familiarisation a duré en moyenne $M = 164$ s (écart-type $ET = 20,3$ s) pour les vingt participants. Au cours de la deuxième phase de l'expérimentation, à savoir la phase de mesures, chaque variante durait 10 oscillations. La durée totale moyenne de cette phase était $M = 170$ s (écart-type $ET = 7,52$ s) pour les vingt participants. La durée totale moyenne de l'expérimentation était $M = 334$ s (écart-type $ET = 29,9$ s).

Il y avait quatre ordres d'exposition possibles, qui étaient contrebalancés entre les participants, comme le résume le Tableau 6.3 (statistiques après exclusion des données relatives aux quatre participants qui n'ont pas suivi les instructions).

Tableau 6.3 Répartition des participants entre les différents ordres d'exposition aux quatre variantes du plan expérimental

Ordre d'exposition	Nombre de participants			Âge des participants	
	Femmes	Hommes	Total	M	ET
HH – LL – HL – HH – LH	1	5	6	33,0	10,3
LL – HH – HL – HH – HL	1	3	4	45,3	18,11
HH – LL – LH – HH – HL	0	3	3	54,7	11,0
LL – HH – LH – HH – HL	2	5	7	35,4	12,1

Au cours d'expérimentations préliminaires, certains sujets ont indiqué qu'ils comptaient beaucoup sur le bruit du servo-moteur pour accomplir leur tâche de régulation. Le servo-moteur que nous utilisons pour la motorisation du guidon intègre en effet un réducteur de rapport élevé ($R = 160$) qui produit inévitablement un bruit important, de

caractéristiques dépendant de la vitesse de rotation de l'actionneur. Cela signifie que le bruit du servo-moteur était différent selon le modèle dynamique de pendule simulé. Certains sujets étaient donc capables de percevoir la différence auditive et de l'utiliser comme un indice significatif. Cependant, notre objectif était de mettre en évidence l'effet spécifique de la cohérence (ou de l'incohérence) entre le modèle dynamique et le retour visuel. Pour cette raison, nous avons décidé de passer de la musique instrumentale aux participants pendant l'expérimentation. La musique a été choisie pour couvrir le bruit du servo-moteur sans distraire les participants.

La position et la vitesse de l'objet simulé, c'est-à-dire la position angulaire et la vitesse de rotation du servo-moteur telles que remontées par le servo-contrôleur ont été enregistrées pendant toute la durée de l'expérimentation. Ces informations sont en effet indicatrices des performances du participant dans sa tâche. Le couple appliqué par le participant sur le pendule simulé pour contrôler ses oscillations, mesuré à l'aide d'une jauge de contrainte, ainsi que le couple courant remonté par le servo-contrôleur ont également été enregistrés. Toutes ces données brutes ont été enregistrées à une période de 1 ms.

Les participants étaient invités à évaluer vocalement leur ressenti sur une échelle de confort/d'inconfort *Misery Scale (MISC)* (Bos et al., 2005) à quatre instants :

1. avant le début de l'expérimentation ;
2. après l'entraînement avec la première variante congruente à laquelle ils étaient confrontés ;
3. après l'entraînement avec la deuxième variante congruente à laquelle ils étaient confrontés ;
4. à la fin de l'expérimentation.

L'échelle leur a été présentée et expliquée avant l'expérimentation.

La procédure complète est représentée sous forme de frise chronologique par la Figure 6.7.

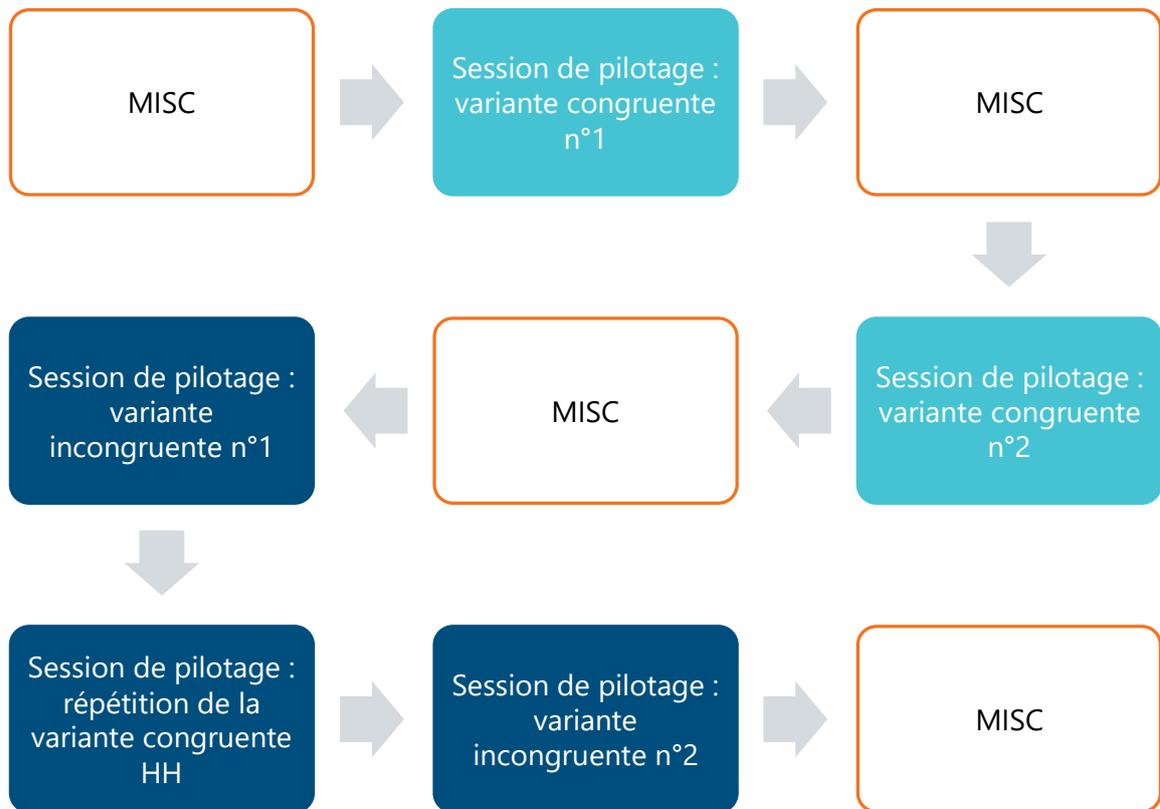


Figure 6.7 Frise chronologique représentant le déroulement de l'expérimentation pilote pour un participant

6.2.5 Variables indépendantes

Comme nous l'avons décrit, le plan expérimental de notre expérimentation était intra-participants. Le facteur intra-participants que nous avons considéré pour l'analyse des données est la condition expérimentale. En tenant compte de notre objectif de mettre en évidence l'effet de la phase d'entraînement, nous avons séparé les variantes de l'expérimentation en 7 conditions expérimentales :

1. variante *HH* pendant la découverte, c'est-à-dire pendant les cinq premières oscillations. Cette condition expérimentale est notée HH_i (i pour initial) ;
2. variante *HH* après l'entraînement, c'est-à-dire pendant les cinq dernières oscillations. Cette condition expérimentale est notée HH_f (f pour final) ;
3. variante *LL* pendant la découverte, condition expérimentale notée LL_i ;
4. variante *LL* après l'entraînement, condition expérimentale notée LL_f ;
5. variante *HL* pendant la découverte ;

6. variante *HH* pendant la répétition, c'est-à-dire pendant les cinq premières oscillations de la seconde exposition. Cette condition expérimentale est notée HH_r (r pour répété) ;
7. variante *LH* pendant la découverte.

6.2.6 Variables dépendantes

À partir des données brutes enregistrées pendant l'expérimentation, nous avons calculé plusieurs variables liées au contrôle moteur pour l'analyse (voir le Tableau 6.4 pour un résumé de ces variables).

Tableau 6.4 Description des variables dépendantes de l'expérimentation - \bar{x} représente la valeur moyenne de x et \tilde{x} son coefficient de variation

Variable	Description
$T = T_1 + T_2$	Durée de l'oscillation
T_1	Pour une oscillation, temps écoulé entre le dernier changement de sens de balancement du pendule et l'arrêt du pendule par le participant
T_2	Pour une oscillation, temps écoulé entre l'arrêt du pendule par le participant et le prochain changement de sens de balancement du pendule
A_θ	Amplitude de l'oscillation
A_τ	Amplitude du couple appliqué par le participant sur le pendule simulé

Tout d'abord, nous avons déterminé la durée de chaque oscillation. Nous avons également considéré séparément :

- la différence de temps entre l'instant où le pendule a commencé son retour vers le participant (dernière position angulaire maximale) et l'instant où il a atteint sa position minimale. Pendant cette durée, le participant a attrapé le pendule et a accompagné son mouvement (peut-être pour estimer son poids), avant de l'arrêter (temporairement) ;
- la différence de temps entre l'instant où le pendule a atteint sa position minimale, c'est-à-dire l'instant où le participant a arrêté le pendule, et la position angulaire maximale suivante du pendule. Après avoir arrêté le pendule, le participant, comme cela lui avait été demandé, a repoussé le pendule dans le but de maintenir ou de corriger l'amplitude de l'oscillation par rapport à la dernière en date. Pendant cette durée, le couple appliqué par le participant sur le pendule simulé est actif.

De plus, nous avons extrait l'amplitude de chaque oscillation, ainsi que l'amplitude du couple appliqué par le participant sur le pendule pendant chaque oscillation.

Nous avons choisi ces mesures car elles sont toutes indicatives à la fois des performances du participant en termes de régulation des oscillations du pendule simulé et du degré de contrôle exercé sur l'objet.

6.3 RESULTATS

Les variables dépendantes décrites ont été analysées au moyen d'analyses de variance (*ANalysis Of VAriance*, abrégé *ANOVA*) à mesures répétées en appliquant la correction de Greenhouse-Geisser. Le seuil de signification statistique utilisé pour les analyses était $\alpha = 0,05$ (5%). Quand les ANOVAs ont mis en évidence des effets significatifs, les résultats ont été analysés plus en détail grâce à des test post hoc en appliquant la correction de Holm-Bonferroni.

Les scores MISC ont été analysés en utilisant un test t pour échantillons appariés.

Les ANOVAs effectuées ont permis de vérifier qu'il n'y avait pas d'effet significatif de l'ordre d'exposition aux variantes du plan expérimental (telles que présentées dans le Tableau 6.1), quelle que soit la mesure dépendante considérée. Il y avait cependant toujours un effet significatif de l'interaction « Condition expérimentale x Ordre d'exposition ». À notre sens, cet effet peut être identifié comme existant entre la première condition expérimentale et les autres, du fait de la diversité des stratégies de contrôle utilisées par les participants en première approche de l'expérimentation.

Dans la suite, nous décrivons donc uniquement les effets intra-participants relevés.

6.3.1 Durée de l'oscillation

Nous avons calculé la durée moyenne de l'oscillation \bar{T} pour les 5 oscillations de chacune des 7 conditions expérimentales. Une ANOVA à mesures répétées a révélé que cette valeur différait significativement selon la condition expérimentale : $F(2,58, 41,35) = 22,96$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,589$. En particulier, les tests post hoc (dont les résultats sont représentés par la Figure 6.8) ont montré des différences significatives entre les valeurs de \bar{T} pour :

- a. HH_i par rapport à HH_f et HH_r ($p = 0,022$ et $p < 0,001$ respectivement) ;
- b. HH_f par rapport à LL_f ($p < 0,001$) ;
- c. HL par rapport à HH_f et HH_r ($p = 0,001$ et $p < 0,001$ respectivement) ;
- d. LH par rapport à LL_f ($p < 0,001$) ;
- e. HL par rapport à LH ($p < 0,001$).

Il n'y avait cependant pas de différence significative ($p > 0,05$) entre :

- HL et LL_f ;
- ou LH et HH_f / HH_r .

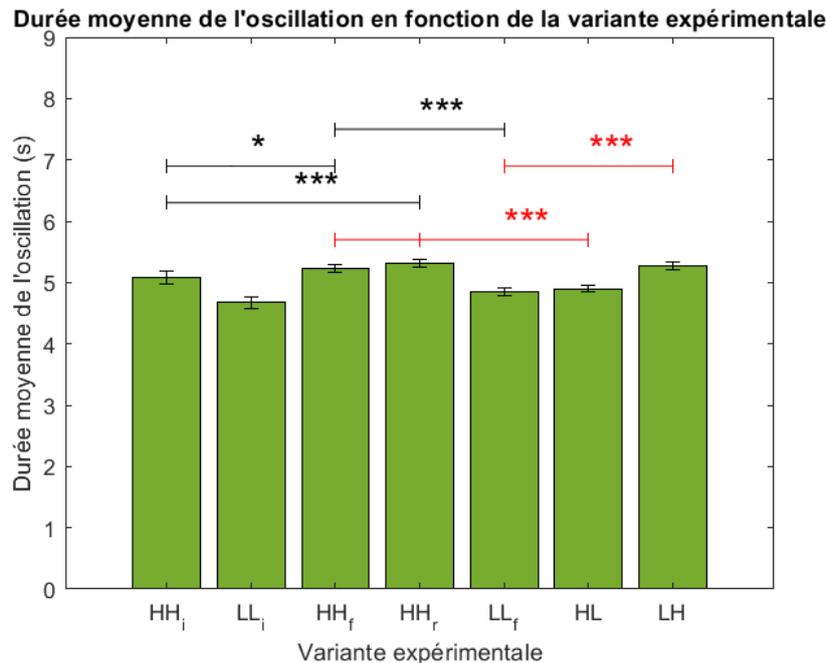


Figure 6.8 Durée moyenne de l'oscillation (en secondes) en fonction de la variante expérimentale (* : $p < 0,05$, *** : $p < 0,001$, noir : effet de l'entraînement, rouge : effet de l'incongruence)

Dans un second temps, nous avons calculé le coefficient de variation de la durée de l'oscillation \tilde{T} pour les 5 oscillations de chacune des 7 conditions expérimentales. Une ANOVA à mesures répétées a révélé que ce coefficient de variation différait significativement selon la condition expérimentale : $F(3,17, 50,78) = 6,07$, $p = 0,001$, $\eta_p^2 = 0,275$. En particulier, les tests post hoc ont montré des différences significatives entre les valeurs de \tilde{T} pour :

- HH_i ($M = 3,74\%$, $ET = 4,13\%$) par rapport à HH_f ($M = 2,02\%$, $ET = 2,00\%$, $p = 0,03$) et HH_r ($M = 1,44\%$, $ET = 0,612\%$, $p = 0,006$) ;
- LL_i ($M = 4,91\%$, $ET = 3,98\%$) par rapport à LL_f ($M = 2,24\%$, $ET = 1,12\%$, $p = 0,022$) ;
- HL ($M = 3,97\%$, $ET = 2,90\%$) par rapport à HH_r ($p < 0,001$) ;
- HL par rapport à LH ($M = 1,60\%$, $ET = 0,797\%$, $p = 0,003$),

mais pas de différence significative ($p > 0,05$) entre LH et HH_r . Ces résultats sont représentés en Figure 6.9.

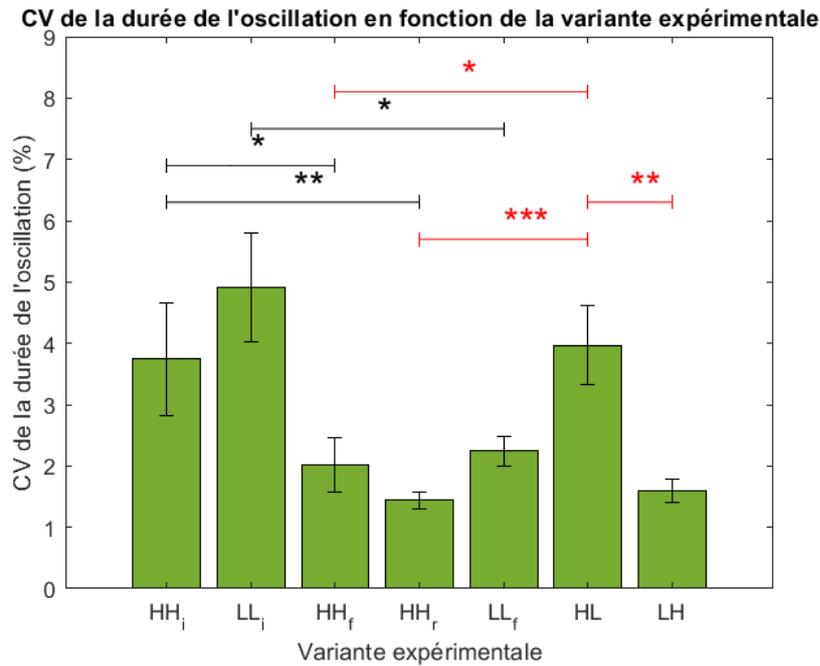


Figure 6.9 Coefficient de variation de la durée de l'oscillation (en pourcentage) en fonction de la variante expérimentale (* : $p < 0,05$, ** : $p < 0,01$, *** : $p < 0,001$, noir : effet de l'entraînement, rouge : effet de l'incongruence)

Une ANOVA à mesures répétées a révélé que \bar{T}_1 différait significativement selon la condition expérimentale : $F(2,55, 40,82) = 7,69$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,325$. En particulier, les tests post hoc ont montré les mêmes différences significatives entre les différentes conditions expérimentales que pour la valeur \bar{T} . Les résultats des analyses étaient similaires pour \bar{T}_2 , c'est-à-dire que cette valeur différait significativement selon la condition expérimentale : $F(2,71, 43,33) = 64,56$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,801$, entre les mêmes conditions expérimentales que pour la valeur \bar{T} .

Enfin, une ANOVA à mesures répétées a révélé que le coefficient de variation \tilde{T}_1 ne différait pas significativement selon la condition expérimentale : $F(2,86, 45,71) = 5,0$, $p = 0,05$. Cependant, une ANOVA à mesures répétées a révélé que le coefficient de variation \tilde{T}_2 selon la condition expérimentale : $F(2,87, 45,85) = 9,06$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,361$. En particulier, les tests post hoc ont montré des différences significatives entre les valeurs de \tilde{T}_2 pour les mêmes conditions expérimentales que pour \tilde{T} .

6.3.2 Amplitude de l'oscillation

Nous avons calculé l'amplitude moyenne de l'oscillation $\overline{A_\theta}$ pour les 5 oscillations de chacune des 7 conditions expérimentales. Une ANOVA à mesures répétées a révélé que

cette valeur différait significativement selon la condition expérimentale : $F(2,40, 38,41) = 11,96, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,428$. En particulier, les tests post hoc (dont les résultats sont représentés par la Figure 6.10) ont montré des différences significatives entre les valeurs de $\overline{A_\theta}$ pour :

- HH_i par rapport à HH_f et HH_r ($p = 0,03$ et $p = 0,004$ respectivement) ;
- HH_f par rapport à LL_f ($p = 0,005$) ;
- HL par rapport à HH_f et HH_r ($p < 0,001$ dans les deux cas) ;
- HL par rapport à LL_f ($p < 0,001$) ;
- LH par rapport à LL_f ($p < 0,001$) ;
- HL par rapport à LH ($p < 0,001$).

Il n'y avait cependant pas de différence significative ($p > 0,05$) entre :

- LL_i et LL_f ;
- ou LH et HH_f / HH_r .

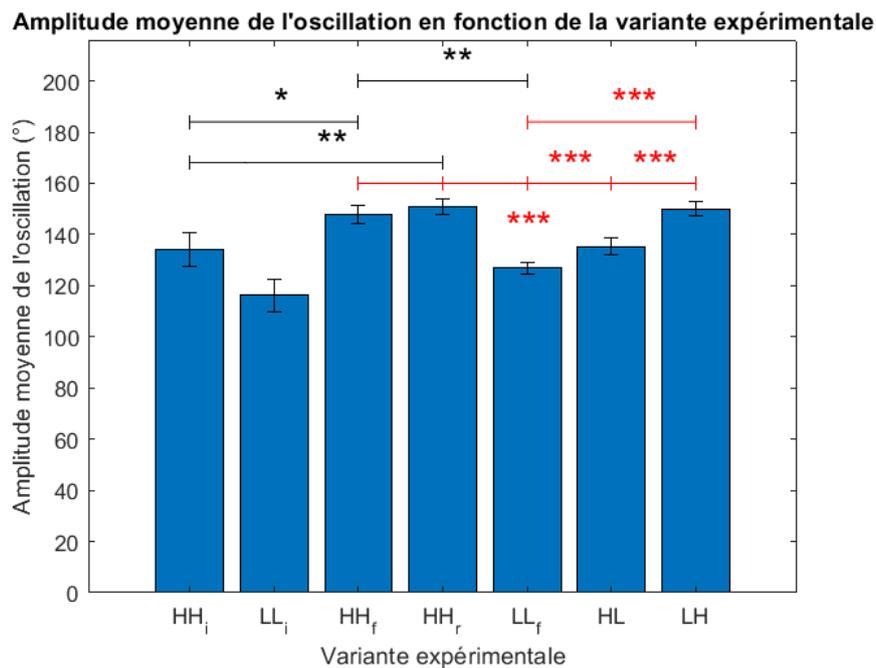


Figure 6.10 Amplitude moyenne de l'oscillation (en centièmes de degré) en fonction de la variante expérimentale (* : $p < 0,05$, ** : $p < 0,01$, *** : $p < 0,001$, noir : effet de l'entraînement, rouge : effet de l'incongruence)

Dans un second temps, nous avons calculé le coefficient de variation de l'amplitude de l'oscillation $\widetilde{A_\theta}$ pour les 5 oscillations de chacune des 7 conditions expérimentales. Une

ANOVA à mesures répétées a révélé que ce coefficient de variation différait significativement selon la condition expérimentale : $F(2,16, 34,64) = 11,76$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,424$. En particulier, les tests post hoc ont montré des différences significatives (dans tous les cas, $p < 0,001$) entre les valeurs de \bar{A}_θ pour :

- HH_i (M = 15,3%, ET = 16,1%) par rapport à HH_f (M = 4,53%, ET = 2,71%) et HH_r (M = 4,64%, ET = 4,65%) ;
- LL_i (M = 21,8%, ET = 19%) par rapport à LL_f (M = 8,34%, ET = 4,65%) ;
- HL (M = 12,2%, ET = 5,67%) par rapport à HH_r ;
- HL par rapport à LH (M = 4,88%, ET = 3,11%),

mais pas de différence significative ($p > 0,05$) entre LH et HH_r . Ces résultats sont représentés en Figure 6.11.

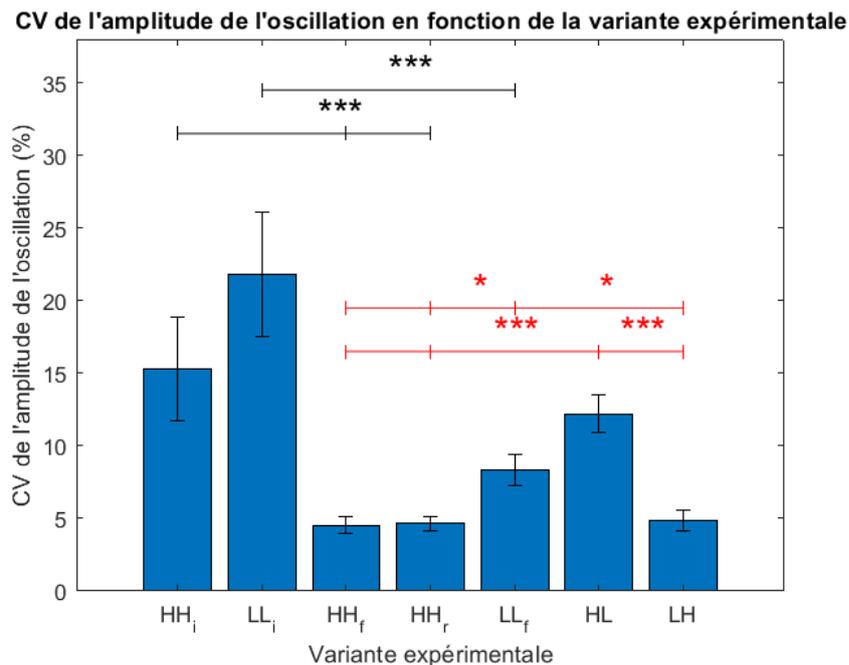


Figure 6.11 Coefficient de variation de l'amplitude de l'oscillation (en pourcentage) en fonction de la variante expérimentale (* : $p < 0,05$, *** : $p < 0,001$, noir : effet de l'entraînement, rouge : effet de l'incongruence)

6.3.3 Amplitude du couple appliqué

Nous avons calculé l'amplitude moyenne du couple appliqué \bar{A}_τ pour les 5 oscillations de chacune des 7 conditions expérimentales. Une ANOVA à mesures répétées a révélé que cette valeur différait significativement selon la condition expérimentale :

$F(3,27, 52,24) = 16,323, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,505$. En particulier, les tests post hoc (dont les résultats sont représentés par la Figure 6.12) ont montré des différences significatives entre les valeurs de \bar{A}_τ pour :

- a. HH_f par rapport à LL_f ($p = 0,003$) ;
- b. HL par rapport à HH_f et HH_r ($p < 0,001$ dans les deux cas) ;
- c. LH par rapport à LL_f ($p < 0,001$) ;
- d. HL par rapport à LH ($p < 0,001$).

Il n'y avait cependant pas de différence significative ($p > 0,05$) entre :

- a. HH_i et HH_f / HH_r ;
- b. LL_i et LL_f ;
- c. HL et LL_f ;
- d. LH et HH_f / HH_r .

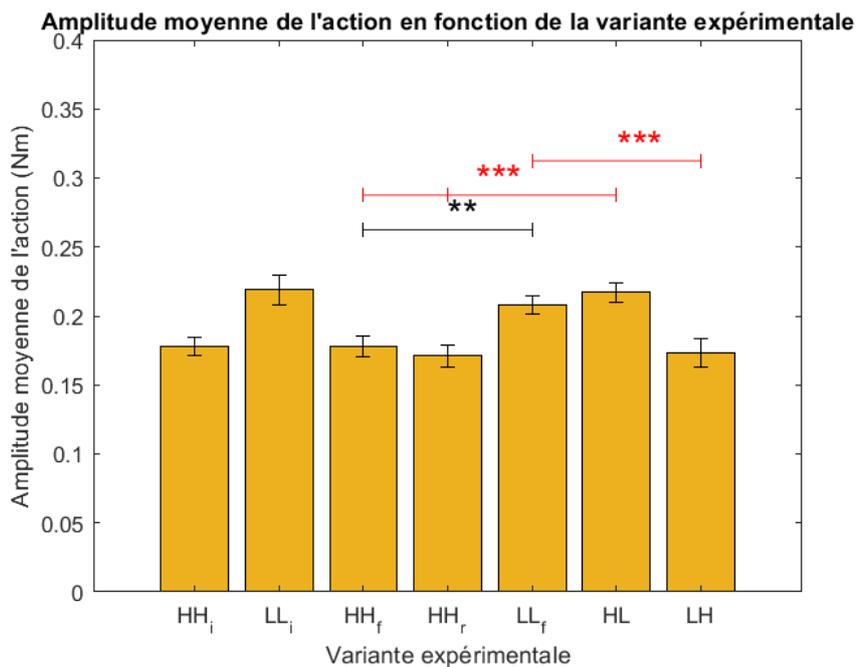


Figure 6.12 Amplitude moyenne du couple appliqué (en Newton mètre) en fonction de la variante expérimentale (** : $p < 0,01$, *** : $p < 0,001$, noir : effet de l'entraînement, rouge : effet de l'incongruence)

Dans un second temps, nous avons calculé le coefficient de variation de l'amplitude de l'oscillation \tilde{A}_τ pour les 5 oscillations de chacune des 7 conditions expérimentales. Une ANOVA à mesures répétées a révélé que ce coefficient de variation différait

significativement selon la condition expérimentale : $F(3,63, 58,07) = 3,44$, $p = 0,016$, $\eta_p^2 = 0.177$. En particulier, les tests post hoc ont montré des différences significatives entre les valeurs de \widetilde{A}_r pour :

- a. HL ($M = 14,9\%$, $ET = 6,66\%$) par rapport à HH_r ($M = 8,67\%$, $ET = 3,35\%$, $p = 0,011$) ;
- b. HL par rapport à LL_f ($M = 9,06\%$, $ET = 4,20\%$, $p = 0,019$) ;
- c. HL par rapport à LH ($M = 9,25\%$, $ET = 7,64\%$, $p = 0,023$),

mais pas de différence significative ($p > 0,05$) entre LH et HH_r . Ces résultats sont représentés en Figure 6.13.

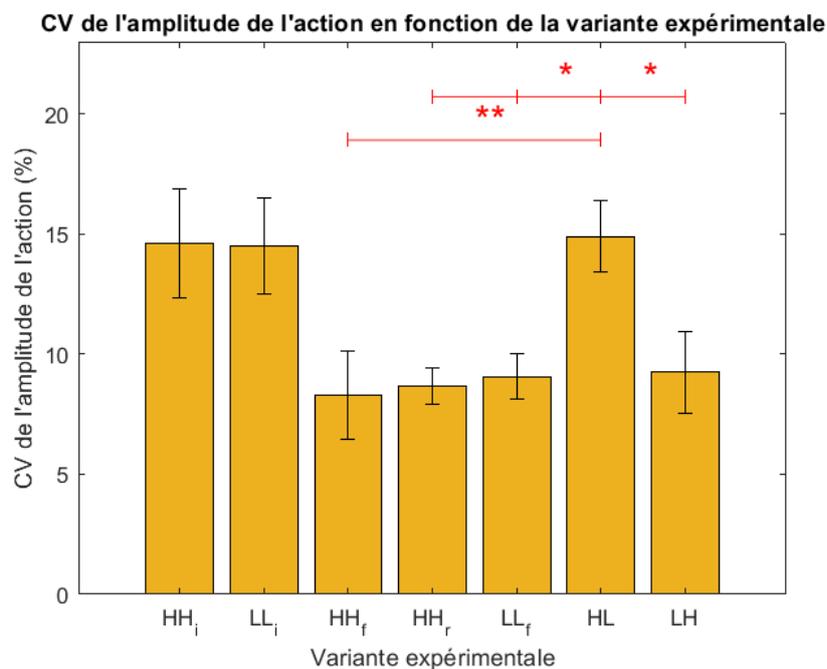


Figure 6.13 Coefficient de variation de l'amplitude du couple appliqué (en pourcentage) en fonction de la variante expérimentale (* : $p < 0,05$, ** : $p < 0,01$, rouge : effet de l'incongruence)

6.3.4 Score MISC

Avant l'expérimentation, tous les participants ($N = 20$) ont évalué leur ressenti à 0 sur l'échelle MISC (c'est-à-dire : « aucun problème »). Cela confirme qu'aucun participant ne ressentait d'inconfort, de malaise ou d'autres symptômes de mal du simulateur préexistants. Un test t pour échantillons appariés a été utilisé pour comparer les scores MISC déclarés par les participants avant et après la phase de mesures. Ce test a révélé une augmentation significative du score MISC pendant la phase de mesures (score

avant cette phase : $M = 0,375$, $ET = 0,930$, score après cette phase : $M = 0,6$, $ET = 1,231$) : $t(19) = 2,13$, $p = 0,023$, avec une taille d'effet moyenne $d = 0,476$.

6.4 DISCUSSION

L'analyse de la durée et de l'amplitude des oscillations du pendule simulé en fonction de la condition expérimentale nous permet d'analyser la forme de ces oscillations, qui est pertinente pour notre expérimentation car c'est que nous avons demandé aux participants de réguler. Il n'est pas possible d'analyser directement le contrôle exercé par le participant sur le pendule, mais la forme des oscillations enregistrée est une conséquence directe des actions de contrôle effectuées par l'opérateur.

D'autre part, pour étudier comment les participants contrôlaient le pendule simulé et quels facteurs affectaient ce contrôle, nous avons analysé l'amplitude du couple appliqué par le participant.

6.4.1 Effet de l'entraînement

Les analyses effectuées ont dans un premier lieu montré qu'il existait, dans le cas de la variante congruente *HH*, une différence significative dans les valeurs moyennes de la durée (\bar{T}) et de l'amplitude (\bar{A}_θ) des oscillations entre avant l'entraînement et après l'entraînement.

Dans le cas de la variante congruente *LL*, ces valeurs moyennes ont également changé entre ces deux instantes, mais pas de manière significative.

En outre, il y avait une différence significative entre les deux variantes congruentes après l'entraînement, ce qui veut dire que la forme des oscillations imposées par les participants était significativement différente d'une variante à l'autre. Cela prouve, d'après nous, que les participants ont construit un modèle interne des pendules lourd et léger grâce à la phase de familiarisation.

De plus, l'analyse des coefficients de variation de la durée (\tilde{T}) et de l'amplitude (\tilde{A}_θ) des oscillations va également dans le sens de cette conclusion : les deux sont significativement moins élevés après l'entraînement pour les variantes congruentes. Cela indique que les modèles internes des pendules lourd et léger construits par les participants étaient plus finement réglés après (et du fait de) l'entraînement.

Ces observations sont synthétisées dans le Tableau 6.5.

Tableau 6.5 Synthèse des effets de l'entraînement sur la forme des oscillations pendant l'expérimentation pilote

	Durée moyenne de l'oscillation	Amplitude moyenne de l'oscillation	Coefficient de variation de la durée	Coefficient de variation de l'amplitude
Variante lourd/lourd (HH)	Augmente significativement		Diminue significativement	
Variante léger/léger (LL)	Augmente		Diminue significativement	
Rapport entre variante HH et variante LL	Significativement différentes après l'entraînement		Pas de différence significative	Coefficient de variation plus grand pour LL
Conclusion	Formation et réglage de modèles internes, pendule LL plus sujet à un contrôle plus variable			

La séparation de la durée de l'oscillation en deux « moitiés » T_1 et T_2 , telles que décrites précédemment, a permis d'identifier un effet principal de la diminution du coefficient de variation de la durée T_2 (\tilde{T}_2) dans la diminution du coefficient de variation de la durée totale (\tilde{T}). Cette différence d'effet peut s'expliquer par le fait que le couple appliqué par le participant pendant la première partie de l'oscillation (durée T_1) est passif, alors qu'il est actif dans la seconde partie (durée T_2). Pendant la première partie de l'oscillation, le participant ne fait qu'estimer le poids du pendule pour déterminer une stratégie de contrôle, et il applique cette stratégie pendant la seconde partie.

Les analyses n'ont pas révélé d'effet significatif de l'entraînement sur la valeur moyenne de l'amplitude du couple ($\overline{A_\tau}$) (pour aucune des deux variantes congruentes). Il y avait cependant une différence significative de cette valeur en fonction de la condition expérimentale, c'est-à-dire du pendule à contrôler. Nous pensons que cela signifie que les participants ont pu déterminer « intuitivement » les ordres de grandeur de couple nécessaires pour contrôler les deux pendules dès le début de l'expérimentation. Cependant, nous constatons une diminution significative du coefficient de variation de l'amplitude du couple ($\widetilde{A_\tau}$) entre le début et la fin de la phase d'entraînement pour les deux variantes congruentes. À notre sens, il s'agit d'une preuve supplémentaire de la construction et du raffinement par les participants d'un modèle interne des deux pendules simulés.

Ces observations sont synthétisées dans le Tableau 6.6.

Tableau 6.6 Synthèse des effets de l'entraînement sur l'action humaine pendant l'expérimentation pilote

	Amplitude moyenne du couple appliqué	Coefficient de variation de l'amplitude du couple appliqué
Variante lourd/lourd (HH)	Pas de différence significative	Diminue significativement
Variante léger/léger (LL)	Pas de différence significative	Diminue significativement
Conclusion	Ordre de grandeur du couple nécessaire déterminé intuitivement dès le début	Formation et réglage de modèles internes

6.4.2 Effet de l'incongruence modèle dynamique / retour visuel

L'analyse des résultats de la deuxième phase de l'expérimentation permet de mettre en évidence que, pour la durée de l'oscillation du pendule (T) et l'amplitude du couple appliqué (A_τ), c'est-à-dire deux des trois variables dépendantes analysées :

- il y avait une différence significative entre les valeurs moyennes pour la condition expérimentale HL et HH_f , mais pas entre celles des conditions HL et LL_f ;
- il y avait une différence significative entre les valeurs moyennes pour la condition expérimentale LH et LL_f , mais pas entre celles des conditions LH et HH_f .

Cela indique que, pour ces deux mesures, les valeurs moyennes dans le cas des variantes incongruentes ont tendance à s'aligner sur la valeur moyenne dans le cas de la variante congruente qui implémente le même modèle dynamique.

D'autre part, les coefficients de variation des trois variables dépendantes (durée (\tilde{T}) et amplitude (\tilde{A}_θ) de l'oscillation, amplitude du couple appliqué (\tilde{A}_τ)) se sont avérés être significativement plus élevés pour la condition expérimentale HL que ceux des conditions HH_f et LH . Les coefficients de variation sont particulièrement significatifs au vu de notre hypothèse : des coefficients de variation importants indiquent une variabilité importante des actions de contrôle effectuées par le participant ainsi que dans les performances du participant. Nous pensons que les différences relevées montrent un impact négatif de

l'inadéquation entre le modèle dynamique et le retour visuel sur la contrôlabilité du pendule simulé et sur les performances des participants, vérifiant donc notre hypothèse.

Ces observations sont synthétisées dans le Tableau 6.7.

Tableau 6.7 Synthèse des effets de l'incongruence modèle dynamique/retour visuel pendant l'expérimentation pilote

	Durée moyenne de l'oscillation	Amplitude moyenne du couple appliqué	Coefficient de variation de la durée de l'oscillation	Coefficient de variation de l'amplitude des oscillations	Coefficient de variation de l'amplitude du couple appliqué
Variante lourd/léger (HL)	Similaire à celle pour la variante léger/léger (LL)		Significativement > à ceux pour la répétition d'une variante congruente		
Variante léger/lourd (LH)	Similaire à celle pour la variante lourd/lourd (HH)		Pas de différence significative avec la répétition d'une variante congruente		
Conclusion	Alignement sur la variante incongruente avec le même modèle dynamique		Effet négatif de l'incohérence modèle dynamique/retour visuel pour la variante HL Pas d'effet pour la variante LH ?		

Pour expliquer pourquoi les coefficients de variation des mesures étudiées sont les plus élevés dans le cas de la variante incongruente HL qui est celle implémentant le modèle dynamique d'un pendule léger avec un visuel de pendule lourd et pourquoi l'autre variante incongruente ne semble pas avoir perturbé les participants, nous proposons d'envisager deux explications possibles.

La première explication éventuelle est que, puisque la tâche que nous avons donnée aux participants s'appuyait principalement sur l'utilisation d'un actionneur à retour haptique, il est possible que les informations haptiques étaient classées par les participants comme prédominantes devant les informations visuelles. Il a été démontré que les informations visuelles dominent les informations haptiques pour un certain nombre de tâches (Pavani et al., 2000), un principe qui est à la base du développement des dispositifs à retour pseudo-haptique (Lécuyer, 2009, 2017). Cependant, d'autres travaux font l'hypothèse que la pondération des retours sensoriels dépend de la tâche considérée (Sober & Sabes, 2005). Nos résultats seraient alors en accord avec hypothèse. Nous pourrions étudier plus

en détail cette explication en testant l'impact de l'adéquation entre modèle dynamique et un retour sensoriel autre que visuel, par exemple auditif.

Une autre explication possible à cette constatation pourrait être un biais d'expérimentation. En effet, en raison à la fois de la construction de notre expérimentation et de l'exclusion des données relatives à certains participants, nous avons pu analyser plus de configurations où une variante incongruente suivait la variante congruente *HH* que *LL* (31 transitions de la variante *HH* contre 9 transitions de la variante *LL* à une variante incongruente). Par conséquent, les participants étaient globalement plus confrontés au modèle dynamique de l'objet lourd, ce qui pourrait avoir un impact sur nos résultats.

6.4.3 Ressenti subjectif des participants

L'analyse du ressenti subjectif rapporté par les participants, sur l'échelle MISC, a montré une augmentation significative du score MISC pendant la phase de mesures (sans symptômes préexistants avant l'expérience).

Même si les scores MISC déclarés par les participants n'étaient pas indicatifs de symptômes sévères du mal du simulateur (le score MISC maximum déclaré était de 3, ce qui correspond à un léger vertige), nos résultats suggèrent que l'incohérence entre le modèle dynamique et le retour visuel augmente significativement l'inconfort des participants.

Cependant, ces résultats pourraient également être une conséquence du temps écoulé depuis le début de l'expérience, qui est bien sûr le plus important pour le dernier score MISC (environ 5 min et 34 s).

6.5 RESULTATS COMPLEMENTAIRES SUR LE POC

La conception d'une colonne de direction pour un simulateur moto est complexe (comme décrit dans les chapitres précédents). L'un des objectifs de l'expérimentation pilote présentée dans ce chapitre était donc de valider la contrôlabilité du nouveau sous-système « guidon motorisé à retour haptique » avant son intégration à notre simulateur de conduite moto. Pour ce faire, nous avons pris en considération deux types de mesures :

- subjectives, résultant des réponses des participants « testeurs » à des questionnaires ;
- objectives, résultant des performances des participants dans la régulation des oscillations d'un pendule simulé.

La Figure 6.14 illustre un exemple des résultats objectifs obtenus : la mesure du couple appliqué sur le guidon par le participant. Ce type de résultats permet de valider que l'on est capable de séparer la dynamique inhérente du système et l'action humaine sur le système, et de mesurer cette dernière. Cette fonctionnalité est fondamentale pour l'intégration du sous-système au simulateur de conduite moto car l'action humaine sur le guidon, à savoir le couple de direction, est l'une des deux entrées de contrôle dont le conducteur dispose pour gérer la trajectoire de son véhicule.

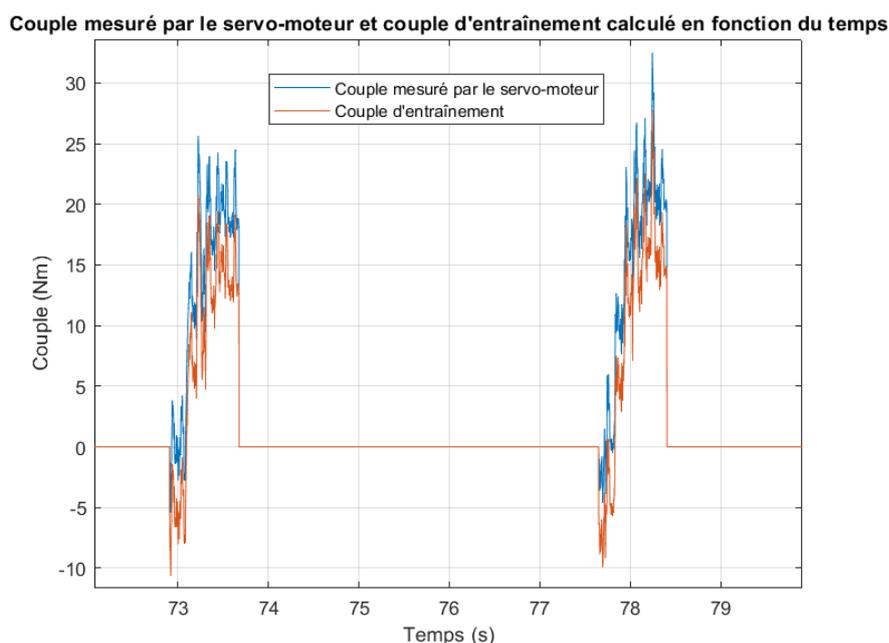


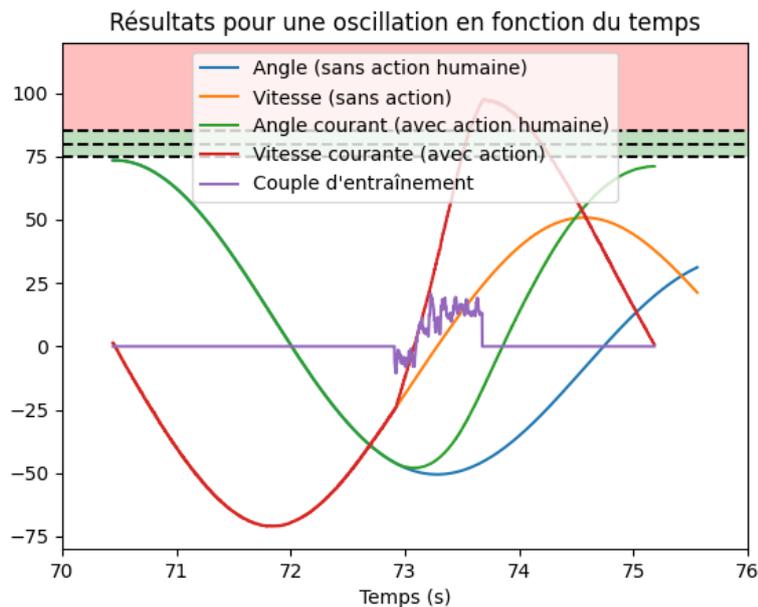
Figure 6.14 Exemple de données collectées pendant l'expérimentation pilote : couple courant mesuré par le servo-moteur et couple « d'entraînement » calculé (en Nm dans les deux cas) en fonction du temps (écoulé depuis le début de l'expérimentation, en s) pour deux actions de contrôle successives d'un participant

La Figure 6.15 illustre quant à elle un extrait des résultats qui confirme qu'il y a bien cohérence physique et temporelle des données système et informations sensorielles. On voit que l'action physique du participant sur le système est capturée (via la jauge de contrainte) et utilisée pour piloter le système. Ces résultats supportent également la conclusion selon laquelle le guidon motorisé que nous avons développé est contrôlable. En effet, nous avons demandé aux participants de réguler les oscillations du pendule, en le poussant à l'image d'une balançoire pour le renvoyer jusqu'à une zone cible, et on voit sur la figure que, dans cet exemple, le participant arrive à ajuster son action d'une oscillation à l'autre et à faire en sorte d'atteindre la zone cible, délimitée par les droites

pointillées (dans la Figure 6.15.a : le pendule n'a pas été poussé assez loin ; dans la Figure 6.15.b : le pendule atteint la zone cible).

Les résultats de l'analyse statistique renforcent cette affirmation. En particulier, le fait que les coefficients de variation des variables mesurées soient plus petits à la fin de l'entraînement avec les variantes congruentes par rapport à ce qu'ils sont pendant la période de découverte, montre que notre système POC est contrôlable après une phase de familiarisation relativement courte (cette phase avait une durée totale moyenne de $M = 170$ s, $ET = 7,52$ s).

Les résultats préliminaires concernant la restitution haptique au niveau du guidon de moto motorisée sont en phase avec notre stratégie de conception et d'instrumentation. Le système POC que nous avons conçu produit des informations haptiques « de bonne qualité », qui permettent au système d'être contrôlable dans le cas où les autres retours sensoriels sont cohérents.



(a)

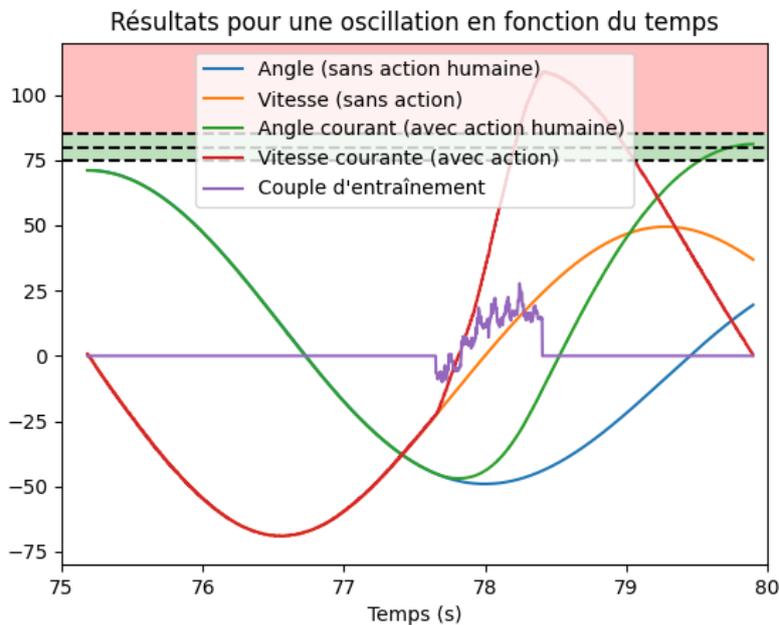


Figure 6.15 Exemple de résultats de l'expérimentation pilote : position angulaire du pendule (théorique ou avec action humaine, en °), vitesse angulaire du pendule (théorique ou avec action humaine, en °/s) et couple appliqué par le participant (en Nm) en fonction du temps (écoulé depuis le début de l'expérimentation, en s), pour deux essais consécutifs :

(a) tâche non réussie (b) tâche réussie

6.6 CONCLUSION PARTIELLE ET PERSPECTIVES

Les concepteurs de simulateurs de conduite ont tendance à privilégier l'implémentation de modèles dynamiques de véhicule de la plus haute fidélité possible, et ce, indépendamment de l'architecture du simulateur et donc de la fidélité sensorielle produite. Cependant, nous émettons l'hypothèse que cette philosophie de conception peut impacter négativement la contrôlabilité du simulateur et donc être doublement préjudiciable à la validité de la simulation ; tant en termes de performances dans la tâche expérimentale que d'occurrence du mal du simulateur.

L'expérimentation décrite dans ce chapitre a consisté en une tâche de contrôle très simple du mouvement d'un objet simulé très simple, alors que la conduite sur simulateur est par nature très complexe. Des effets multiples, par exemple liés au fait qu'une tâche de conduite implique un mouvement propre du conducteur (contrairement à la tâche dans l'expérimentation décrite dans ce chapitre), doivent impérativement être pris en compte pour tenter d'expliquer l'occurrence du mal du simulateur. Néanmoins, les résultats de

notre expérimentation « pilote », obtenus par l'analyse des performances de régulation de nos participants et de leur ressenti subjectif (évalué sur l'échelle MISC), ont tendance à soutenir notre hypothèse. Ils démontrent en effet que l'incohérence entre le modèle dynamique et le retour visuel :

1. diminue la contrôlabilité d'un objet simulé/d'un système POC ;
2. augmente le sentiment d'inconfort ou de malaise ressenti par l'opérateur.

Les résultats décrits attirent ainsi l'attention sur la nécessité d'une adéquation entre les différents éléments (matériel, logiciel, modèle) d'un simulateur pour assurer sa contrôlabilité et ainsi éliminer les mouvements résultants indésirables susceptibles d'être perçus comme erratiques par le conducteur. Si cette adéquation est atteinte, alors la contrôlabilité du simulateur est augmentée et l'occurrence du mal du simulateur minimisée.

Comme expliqué, d'autres expérimentations seraient nécessaires pour approfondir et valider notre hypothèse. Tout d'abord, en menant à nouveau cette expérimentation, mais avec un soin particulier à équilibrer le nombre de transitions entre les variantes congruentes et incongruentes, nous pourrions ainsi éliminer toute possibilité d'un biais expérimental qui affecterait nos résultats. Pour cela, il faudrait dans la phase de mesures, répéter aléatoirement et de façon contrebalancée entre les participants soit l'une soit l'autre des variantes congruentes, au lieu de répéter toujours la même. La procédure complète révisée est représentée sous forme de frise chronologique par la Figure 6.16.

Il pourrait également être bénéfique de répéter l'expérimentation en intégrant un groupe témoin qui ne serait pas confronté aux variantes incongruentes, mais avec une durée d'expérience environ égale.

Dans un second temps, il serait intéressant d'explorer les résultats obtenus en se concentrant sur d'autres systèmes sensoriels, par exemple en introduisant une incohérence entre modèle dynamique et retour auditif (au lieu de visuel). Selon la tâche, le retour auditif peut en effet être pertinent, pour le contrôle moteur humain. On peut prendre comme exemple des travaux portant sur la relation entre l'audition et l'estimation de la vitesse. Une expérimentation sur simulateur de conduite menée par McLane et Wierwille a mis en évidence une augmentation de la vitesse pratiquée par les participants en l'absence de restitution du bruit du moteur (une information sensorielle présente dans la réalité) (McLane & Wierwille, 1975). Dans la même lignée, Horswill et McKenna ont relevé, dans une expérimentation de simulation s'appuyant des projections de vidéo, un

choix de vitesse de déplacement plus faible plus le niveau de bruit interne à la voiture était élevé (Horswill & McKenna, 1999).

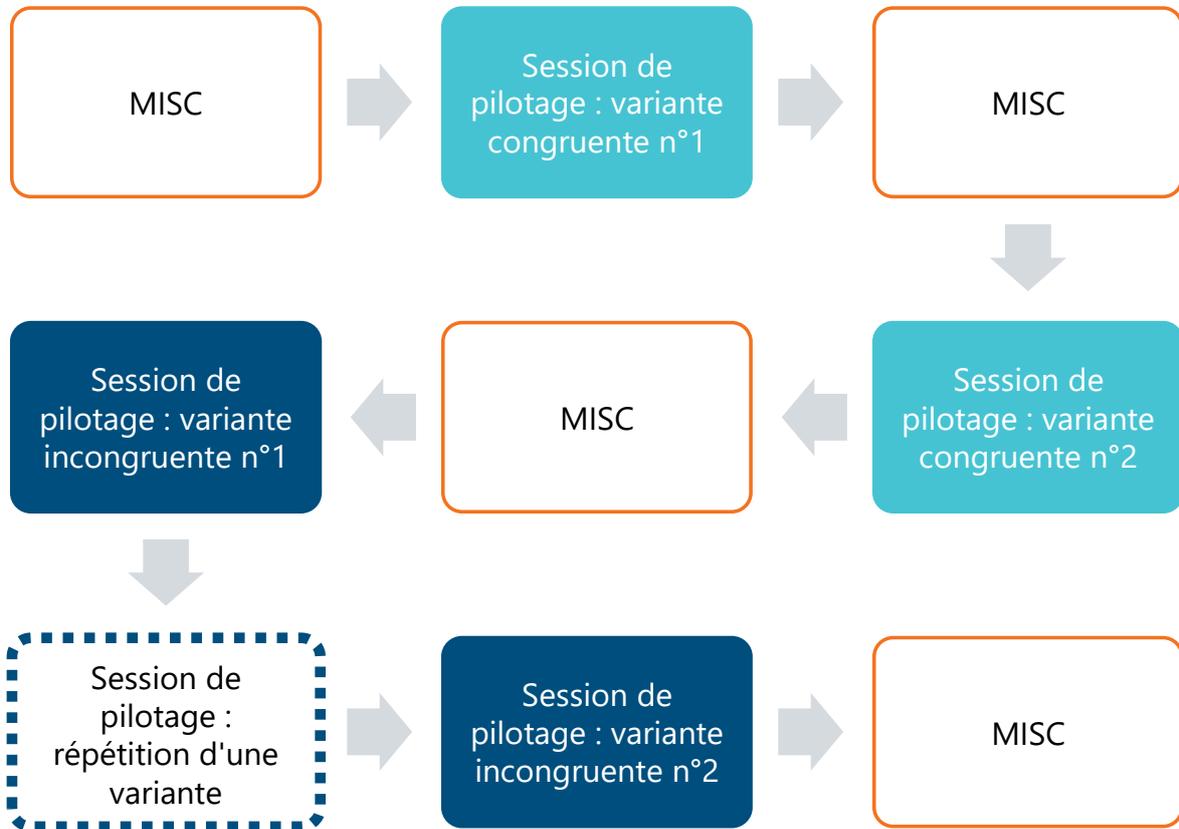


Figure 6.16 Frise chronologique représentant le déroulement révisé de l'expérimentation pour un participant (l'étape à modifier est indiquée par l'encadré pointillé)

Enfin, comme nous l'avons expliqué, cette expérimentation est une expérimentation pilote. L'objectif final de nos travaux est de pouvoir tester notre hypothèse dans le cas « difficile » du contrôle de trajectoire dynamique d'une moto sur un simulateur. Pour ce faire, nous avons travaillé à la mise en place d'un scénario sur simulateur de conduite moto centré sur l'impact de l'adéquation modèle dynamique de moto / complexité de l'architecture du simulateur sur les aspects suivants : sentiment de présence et contrôle de trajectoire (avec un effet induit relatif au ressenti général du conducteur, et à l'occurrence du mal du simulateur).

7 APPROCHE CENTREE CONTROLABILITE, VERSANT N°2 : APPLICATION A NOTRE SIMULATEUR MOTO

Comme nous l'avons déjà indiqué, la simulation de conduite « humain-dans-la-boucle » vise à créer l'illusion de conduire en stimulant les systèmes sensoriels du conducteur, dans des conditions aussi réalistes que possibles (notamment via l'environnement de simulation incluant l'infrastructure de la route et les autres acteurs du trafic). Cependant, les simulateurs de conduite ne peuvent produire, et ce en fonction du degré de raffinement de leur architecture, qu'un sous-ensemble des stimuli sensoriels sur lequel le conducteur pourrait s'appuyer pour conduire son véhicule dans une situation de conduite réelle. Ce sous-ensemble doit être choisi avec soin car il est crucial pour la contrôlabilité et (par voie de conséquence) pour l'acceptabilité d'un tel système, censé être un outil sur lequel s'appuyer pour apprendre ou comprendre.

Nos travaux concernent en particulier un simulateur physique dynamique (c'est-à-dire à base mobile) de conduite moto.

Dans le chapitre décrivant le simulateur moto qui fait l'objet de nos travaux, nous avons présenté sa structure bi-corps qui met en jeu deux corps dynamiques :

1. la colonne de direction, d'une part ;
2. la plate-forme mobile (châssis), d'autre part.

Vu la complexité de la question du guidon dans la conduite moto (qui fait partie du corps dynamique colonne de direction), nous l'avons traitée à part et y avons déjà consacré le chapitre 5.

Ce chapitre reprend l'approche centrée contrôlabilité que nous avons proposée précédemment et l'applique à l'instrumentation des deux corps dynamiques de notre simulateur de conduite moto. L'apport de nos travaux réside en fait dans cette approche : la contrôlabilité d'un simulateur (et dans une autre mesure son acceptabilité) est essentielle pour la validité de tous les résultats obtenus à l'aide de ce simulateur.

Dans ce chapitre, nous détaillons la conception de l'architecture matérielle et logicielle de notre simulateur en prenant en compte cette contrainte, notamment à travers l'intégration du système de guidon motorisé, que nous avons conçu et dont nous avons vérifié la contrôlabilité. Nous avons couplé ce dernier au reste du système, et avons

apporté des modifications à la structure originale du simulateur. Nous abordons en particulier les capteurs, les actionneurs et les flux de données mis en place, permettant :

1. de capturer les actions du conducteur en temps réel ;
2. de restituer en temps réel le comportement de la moto au conducteur ;
3. de mesurer et d'étudier les interactions conducteur/moto simulée.

Nous pensons que la méthodologie que nous proposons pourrait être adoptée par les concepteurs des futurs simulateurs de conduite moto et étendus à d'autres simulateurs « humain-dans-la-boucle » afin d'améliorer la qualité des restitutions sensorielles implémentées (y compris la restitution de mouvement) et leur contrôlabilité.

7.1 CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA DIFFERENCE ENTRE CONDUITE D'UNE MOTO ET CONDUITE D'UN SIMULATEUR MOTO

Nous avons déjà mentionné que tous les phénomènes physiques propres à la conduite moto ne peuvent pas être reproduits physiquement par un simulateur. Par exemple, dans notre simulateur, il n'y a pas de roue ni de portion de route, ce qui signifie que le couple résultant du contact pneu/route, que subit la colonne de direction, ne peut être que modélisé et simulé à travers des calculs.

Pendant un déplacement, si l'on considère que la moto est à l'instant $t = t_0$ à un point d'équilibre, c'est-à-dire évoluant à une vitesse stable, avec une attitude (angle de guidon, roulis, tangage et lacet) stables, le conducteur peut vouloir modifier sa trajectoire. Pour ce faire, il peut par exemple agir sur le guidon (en combinaison ou alternativement sur le roulis). L'action du conducteur déstabilise temporairement la moto, jusqu'à atteindre un nouveau point d'équilibre à un instant $t = t_1$.

Pour mieux comprendre la différence fondamentale entre une tâche de conduite de moto et une tâche de conduite d'un simulateur moto, nous proposons de l'illustrer par une situation où l'on déplace une balle située dans un bol. Le point d'équilibre dans cette situation est représenté par le fond du bol. La forme exacte du bol est définie par la situation de conduite à l'instant $t = t_0$ considéré. Nécessairement (et notamment du fait de l'architecture du simulateur), la forme du bol correspondant à la situation de conduite simulée est différente de celle du bol correspondant à la situation de conduite réelle. Le point d'équilibre de la balle représentant la moto simulée est par conséquent différent de celui de la balle représentant la moto réelle. Cette image, illustrée à la Figure 7.1 permet de comprendre que, selon les différences entre les situations de conduite simulée et réelle, la moto simulée peut converger vers un point d'équilibre différent de celui vers

lequel convergerait la moto réelle, voire ne pas converger vers un point d'équilibre du tout. Dans ce dernier cas, le simulateur n'est pas contrôlable ; le conducteur perd le contrôle de sa moto simulée, ce qui pose un problème pour l'acceptabilité du simulateur.

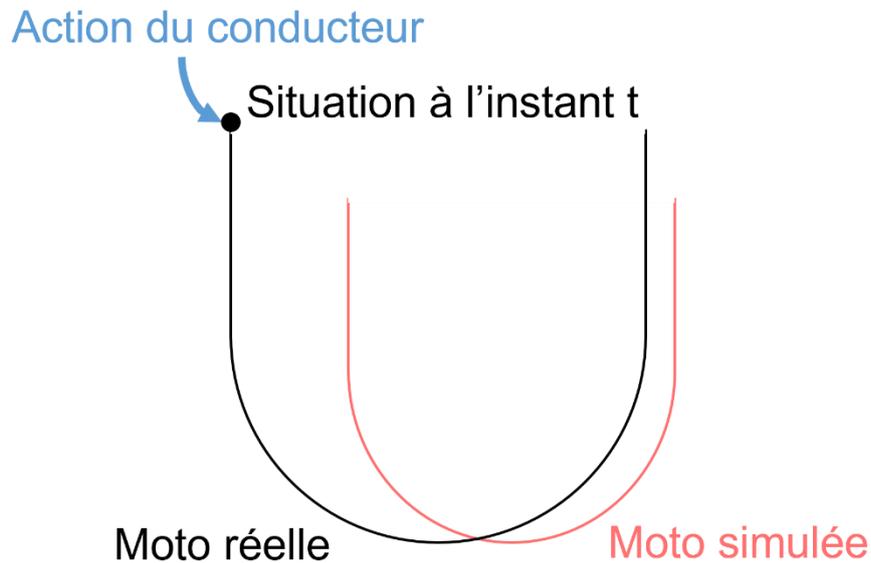


Figure 7.1 Représentation imagée de la différence des paramètres de stabilité d'une moto simulée (cas représenté par le bol rouge) par rapport à ceux d'une moto réelle (cas représenté par le bol noir). La balle représente la situation à l'instant $t = t_0$ où le conducteur effectue une action (représentée par la flèche bleue)

7.2 UN ENSEMBLE DE MODELES

Lors de la présentation de l'architecture matérielle et logicielle de notre simulateur, nous avons expliqué que, pendant nos travaux, nous avons remplacé l'architecture de calculs initiale par une architecture de calcul distribuée (représentée schématiquement sur la Figure 7.2), avec plusieurs microcontrôleurs et FPGA embarqués de sorte à réduire la charge de calcul laissée au PC (qui n'utilise pas un système d'exploitation temps réel), à rapprocher les calculs au plus proche des éléments physiques concernés, et à paralléliser physiquement les calculs pour réduire les latences.

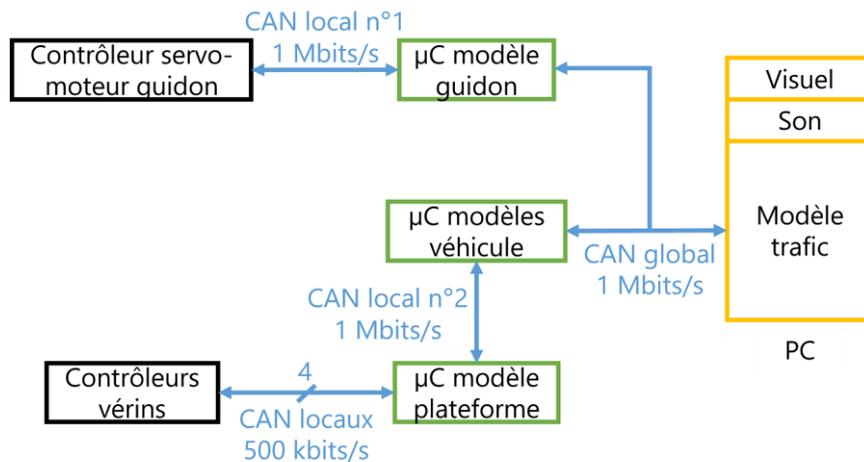


Figure 7.2 Architecture fonctionnelle du simulateur dans sa version actuelle

Le Tableau 7.1 synthétise l'organisation temporelle des différents modèles calculés.

Tableau 7.1 Synthèse des contraintes temporelles spécifiques aux différents modèles calculés par notre simulateur et des périodes de calcul choisies

Modèle		Période de calcul	Contrainte principale
Modèle de moto	Modèle dynamique	5 ms	Stabilité de la moto virtuelle
	Modèle cinématique	10 ms	
Modèle de guidon		5 ms	Sensibilité de la perception haptique humaine
Modèle de plate-forme mobile		10 ms	Sensibilité de la perception kinesthésique humaine
Modèle de l'environnement		Approx. 16 ms (60 Hz)	Sensibilité de la perception visuelle humaine

Toutes ces périodes de calcul sont des choix que nous avons effectués, à la suite de notre expertise acquise et respectant les paradigmes que nous avons posés sur la contrôlabilité.

En ce qui concerne le modèle de guidon, dans notre système POC, la période de calcul utilisée était de 1 ms. Lors de l'intégration du guidon motorisé développé à notre simulateur de conduite, nous avons choisi d'augmenter cette période à 5 ms. Du point de vue du conducteur, cette temporalité répond toujours aux contraintes détaillées précédemment, surtout étant donné que le conducteur dispose d'informations

sensorielles beaucoup plus riches dans le cas du simulateur complet (audio, restitution de mouvement, scène visuelle beaucoup plus complexe). Nous avons vérifié qu'une période de 5 ms est suffisante pour le conducteur grâce à des tests de contrôlabilité sur le même modèle que l'expérimentation pilote décrite, mais à plus petite échelle (pour un conducteur « expert »). Du point de vue du système, le choix de cette période plus élevée permet de ne pas surcharger les autres sous-systèmes qui interagissent avec le sous-système du guidon, en termes de commande à envoyer et de données reçues en retour.

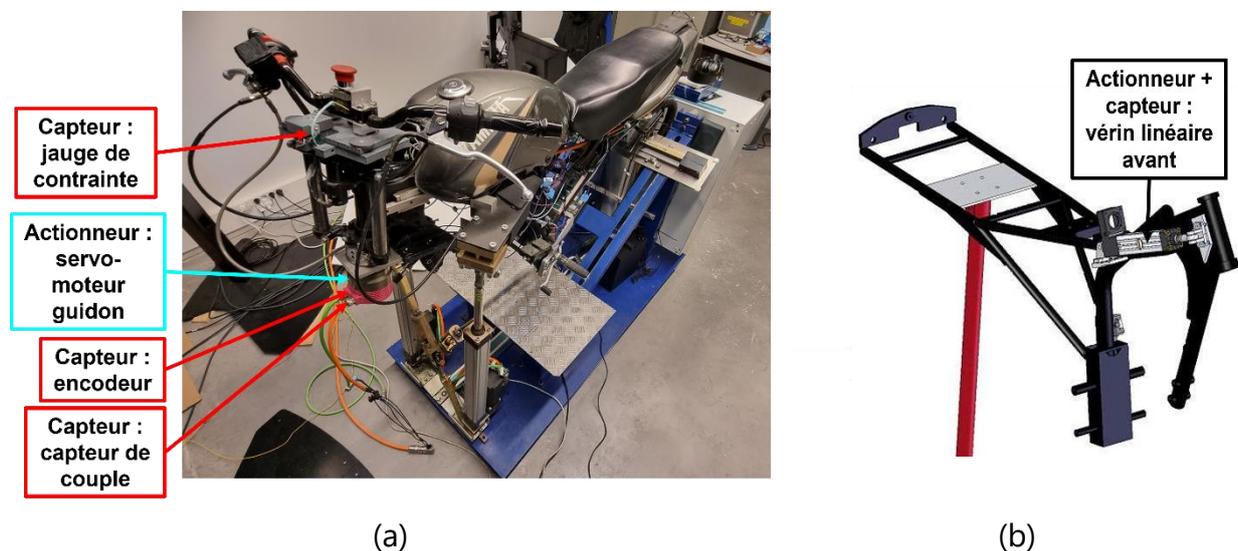
7.3 CORPS DYNAMIQUE N°1 : LA COLONNE DE DIRECTION

7.3.1 Flux de données capteurs/actionneurs de la colonne de direction

Pour rappel, le système colonne de direction (corps dynamique n°1) combine les deux aspects suivants :

1. le contrôle de l'angle de guidon (par le sous-système de guidon motorisé) ;
2. et le contrôle de la distance guidon/conducteur.

La seconde partie (distance guidon/conducteur) est gérée par un vérin linéaire piloté par un moteur brushless. La localisation des capteurs et des actionneurs de la colonne de direction est détaillée dans la Figure 7.3.



Les amplitudes de tous les mouvements peuvent être réduites ou augmentées indépendamment les unes des autres et « à la volée » grâce à des gains configurables, transmis via un bus CAN (ces informations sont contenues dans des trames CAN de données non périodiques).

Les données échangées concernant la colonne de direction sont synthétisées dans le Tableau 7.2 (avec les notations de la Figure 7.2).

Tableau 7.2 Synthèse des données échangées concernant le corps dynamique n°1 : la colonne de direction

Données brutes	Période	Méthode de transmission	Capteur/actionneur	Données calculées
Position de l'actionneur (M ¹ et C ²)	5 ms	Bus CAN local n°1 (guidon)	Servo-moteur guidon (encodeur)	Angle du guidon
	10 ms	Bus CAN local n°2 (plate-forme + rallonge)	Vérin linéaire avant	Élongation linéaire de la rallonge
Vitesse de l'actionneur (M et C)	5 ms	Bus CAN local n°1	Servo-moteur guidon	Vitesse angulaire du guidon
	10 ms	Bus CAN local n°2	Vérin linéaire avant	Vitesse linéaire de la rallonge
Couple de l'actionneur (M et C)	5 ms	Bus CAN local n°1	Servo-moteur guidon (capteur de couple)	Couple de direction
Force (M)	5 ms	Bus CAN local n°1	Jauge de contrainte	

¹ M : mesuré ; ² C : commandé

7.3.2 Le degré de liberté de l'angle de guidon

Dans un simulateur moto, l'état du guidon (position, vitesse et accélération angulaires) doit être contrôlé par le modèle de véhicule. Dans le cas de notre simulateur moto, intégrant un guidon motorisé, il existe un couplage physique significatif entre le capteur et l'actionneur pour cette interface conducteur/simulateur.

Revenons au principe d'une interface capteur réel/actionneur réel (représenté schématiquement sur la Figure 3.4 de la section 3.3).

L'interface de la fonction angle de guidon est caractérisée par les relations suivantes :

- relations A et B : données de force des capteurs (représentant directement les actions humaines sous la forme du couple de direction et du couple de roulis) et la position et la vitesse du servo-moteur (modifiées par les actions humaines) ;
- relation C : le pilotage par le modèle de véhicule du servo-moteur motorisant le guidon, d'une part, et des actionneurs gauche et droit motorisant le roulis et le tangage de la plate-forme mobile, d'autre part ;
- relation D : couplage nécessaire à l'acceptabilité du simulateur par le conducteur.

Les actions du conducteur, mesurées en termes de couple de direction et de couple de roulis, doivent être toutes les deux prises en compte lors du pilotage du guidon motorisé pour générer un mouvement de rotation qui soit acceptable, c'est-à-dire, notamment, physiquement et temporellement cohérent.

Le couple de direction est calculé à partir de la mesure du couple courant remontée par le servo-moteur et de la mesure réalisée par la jauge de contrainte. La relation entre ces éléments a été déterminée grâce à un processus d'étalonnage. Cette relation ne dépend pas du conducteur, mais uniquement de l'ensemble « colonne de direction », le processus d'étalonnage n'a pas besoin d'être répété. La Figure 7.4 présente un exemple des données utilisées pour déterminer la relation entre le couple de direction et le couple courant remonté par le servo-moteur/les données de la jauge de contrainte.

Le logigramme de la Figure 7.5 montre le processus de calcul du couple de direction. La valeur obtenue est utilisée comme entrée du modèle de moto.

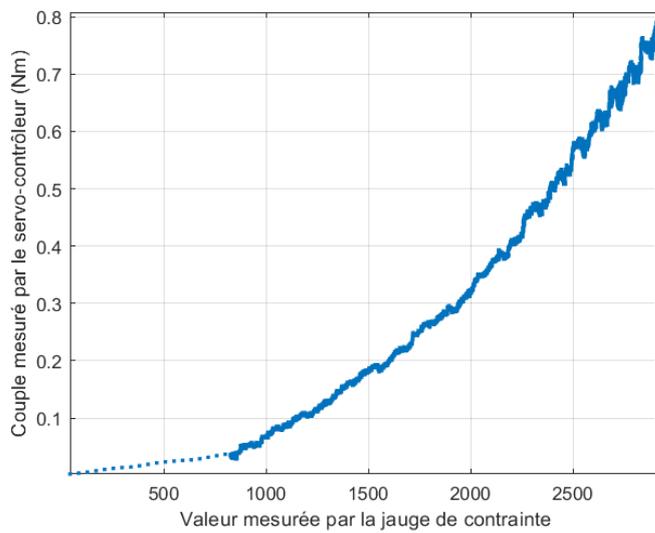


Figure 7.4 Données utilisées pour déterminer le couple de direction en fonction des données du servo-moteur et la jauge de contrainte (données collectées dans le cas de notre système POC) : couple courant mesuré par l'actionneur (en Nm) en fonction de la valeur mesurée par la jauge de contrainte (valeur sans dimension codée sur 12 bits, allant de 0 à 4095). Ces mesures ont été faites sans aucune action humaine sur le système

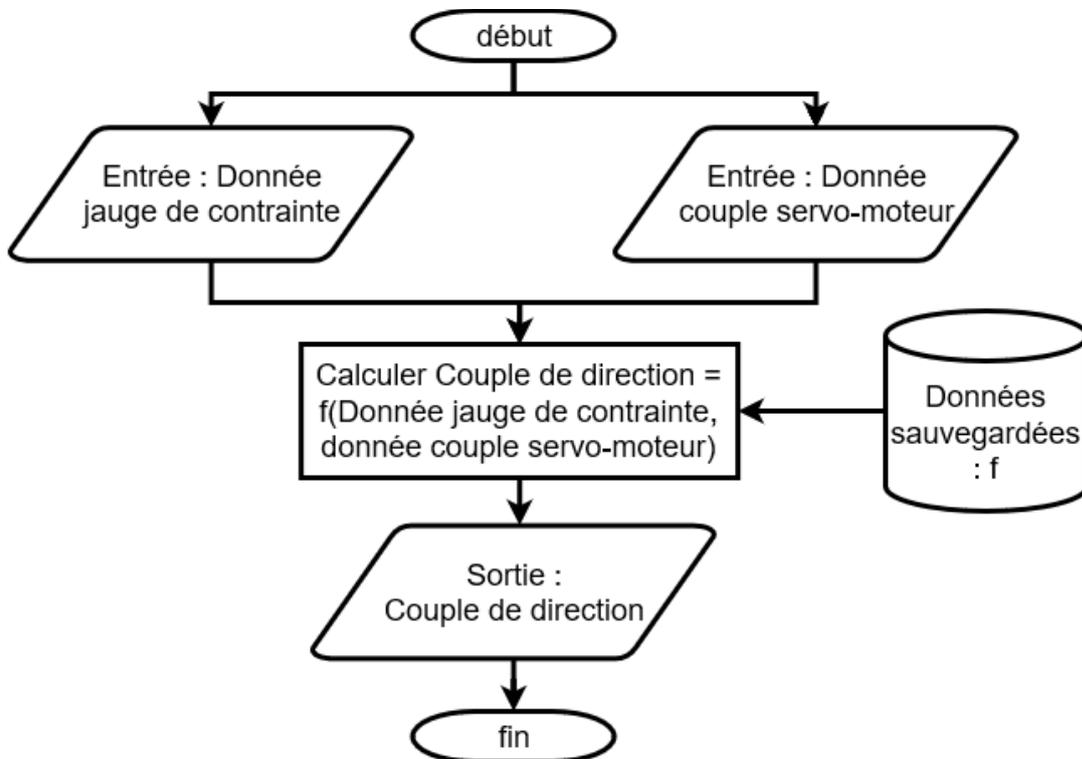


Figure 7.5 Logigramme du calcul du couple de direction

7.4 CORPS DYNAMIQUE N°2 : LA PLATE-FORME MOBILE

7.4.1 Flux de données capteurs/actionneurs de la plate-forme mobile

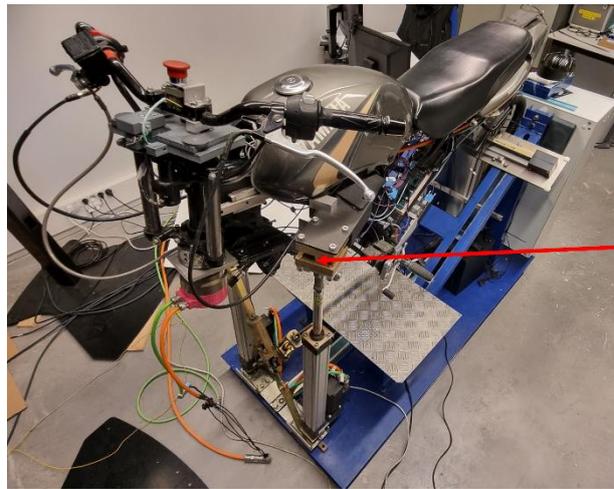
Le châssis du simulateur est adapté d'une moto réelle et monté sur une plate-forme dynamique à 3 DDLs, qui sont les suivants :

1. roulis et 2. tangage, gérés par deux vérins linéaires (à l'avant du simulateur) et deux moteurs brushless ;
3. lacet, géré par une glissière (à l'arrière du simulateur) et un moteur brushless.

La localisation des capteurs et des actionneurs de la plate-forme mobile est détaillée dans la Figure 7.6.

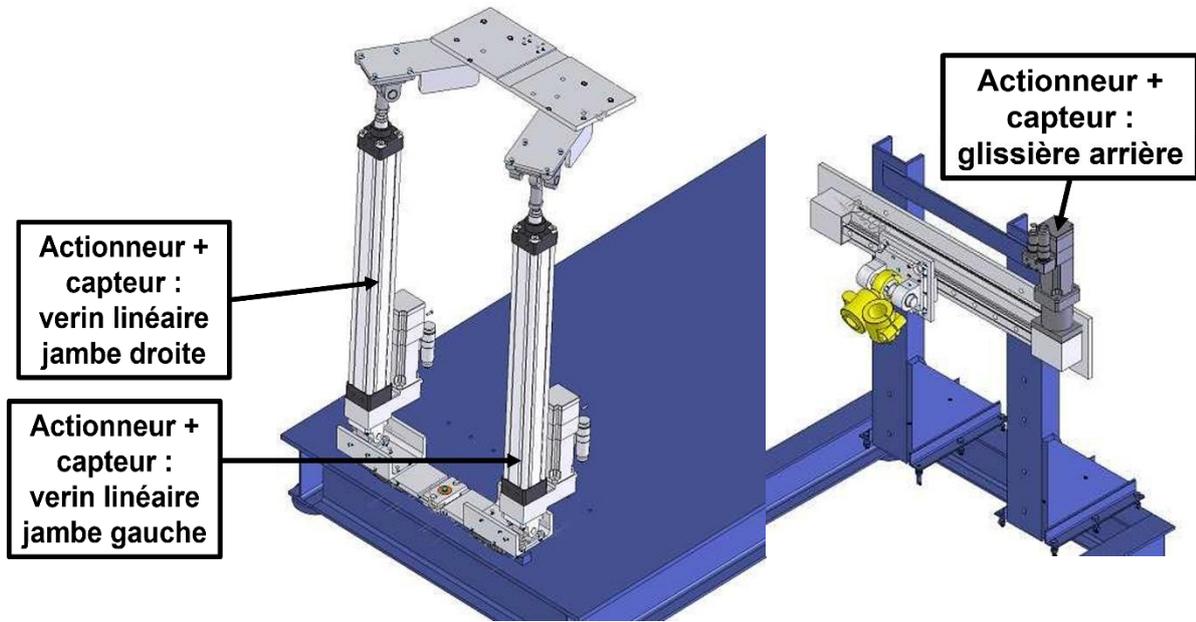
Les amplitudes de tous les mouvements peuvent être réduites ou augmentées indépendamment les unes des autres et « à la volée » grâce à des gains configurables, transmis via un bus CAN (ces informations sont contenues dans des trames CAN de données non périodiques).

Les données échangées concernant la colonne de direction sont synthétisées dans le Tableau 7.3 (avec les notations de la Figure 7.2).



**Capteur :
capteur
de force
jambe
gauche**

(a)



**Actionneur +
capteur :
verin linéaire
jambe droite**

**Actionneur +
capteur :
verin linéaire
jambe gauche**

**Actionneur +
capteur :
glissière arrière**

(b)

(c)

Figure 7.6 Localisation des capteurs de force (utilisés pour le calcul du couple de roulis) ; (b) CAO des jambes avant (utilisées pour la restitution du mouvement de roulis et de tangage) ; (c) CAO de la glissière arrière (utilisée pour la restitution du mouvement de lacet)

Tableau 7.3 Synthèse des données échangées concernant le corps dynamique n°2 : la plate-forme mobile

Données brutes	Période	Méthode de transmission	Capteur/Actionneur	Données calculées	
Position de l'actionneur (M ¹ et C ²)	10 ms	CAN bus local n°2 (plate-forme mobile + rallonge)	Actionneur jambe gauche	Élongation linéaire de la jambe gauche	Angle de roulis et de tangage du châssis
			Actionneur jambe droite	Élongation linéaire de la jambe droite	
			Actionneur glissière	Déplacement linéaire de la glissière	Angle de lacet du châssis
Vitesse de l'actionneur (M et C)	10 ms	CAN bus local n°2	Actionneur jambe gauche	Vitesse linéaire de la jambe gauche	Vitesses angulaires de roulis et de tangage du châssis
			Actionneur jambe droite	Vitesse linéaire de la jambe droite	
			Actionneur glissière	Vitesse linéaire de la glissière	Vitesse angulaire de lacet du châssis
Force (M)	5 ms	Signaux analogiques	Capteur de force jambe gauche	Couple de roulis	
			Capteur de force jambe droite		

¹ M : mesuré ; ² C : commandé

7.4.2 Le degré de liberté de l'angle de roulis

Le mouvement de roulis est essentiel pour la stabilisation et le guidage d'une moto réelle. Cependant, pour la simulation de conduite moto, il existe un certain nombre de questions et de limitations à ce niveau. Par exemple, il n'est pas possible de restituer les forces centrifuges et centripètes lors d'un virage.

Les concepteurs des simulateurs de moto existants aujourd'hui ont fait le choix de différentes stratégies pour pallier cette absence, notamment en essayant de combiner

une inclinaison de la scène visuelle et une inclinaison (un angle de roulis) de la plate-forme physique (Benedetto et al., 2014; Cossalter et al., 2010; Kageyama & Tagami, 2002). En fonction de l'architecture de leur simulateur, il faut pour ce faire établir un compromis entre l'inclinaison de la plate-forme avec une vitesse angulaire suffisante pour signaler au conducteur (et à ses systèmes sensoriels) le début du mouvement de roulis, tout en limitant l'angle de roulis effectif pour éviter toute sensation de chute ou de déséquilibre critique.

La solution utilisée dans notre simulateur est de limiter l'angle de roulis de la plate-forme et d'ajouter un angle de roulis visuel (Lobjois et al., 2016; Shaha et al., 2014) en inclinant l'image dans la direction opposée au virage, afin de donner au conducteur la sensation de se rapprocher du sol (Stedmon et al., 2011). L'amplitude du mouvement de roulis visuel peut être configurée en fonction des besoins de l'expérience.

Pour calculer le couple de roulis appliqué par le conducteur sur la moto simulée, nous utilisons des capteurs de force situés sur le dessus de chacun des deux jambes avant de notre simulateur. Ces capteurs de force sont des transducteurs de force en traction/compression (N.B. : seule la force en compression est pertinente dans notre cas). Le positionnement des capteurs est une question cruciale. Nous avons choisi de les aligner sur le plan horizontal du châssis, qui est plus bas que le centre de gravité de l'ensemble formé par la moto et le conducteur. Cela signifie que selon la stratégie utilisée par le conducteur pour appliquer un couple de roulis (soit modification de son centre de gravité en s'accrochant au réservoir avec ses jambes, soit en poussant sur les repose-pieds, soit une action mixte), la capture de son action peut être plus ou moins efficace.

Pour ce choix d'instrumentation, la moto simulée est systématiquement auto tombante (comme l'est une moto réelle) si une compensation du poids de la moto et du conducteur n'est pas implémentée. En effet, les capteurs de force des jambes du simulateur mesurent le poids du conducteur, qui n'est pas distribué en les deux capteurs de la même manière selon l'angle de roulis de la plate-forme. Par conséquent, nous prenons en compte le poids du conducteur lors du calcul du couple de roulis à partir des données des capteurs de force. Nous avons implémenté une correction des valeurs mesurées par les capteurs de force en fonction de l'inclinaison de la plate-forme, c'est-à-dire de l'angle de roulis du châssis).

Lorsque le conducteur est en position sur le châssis de la moto au début de l'expérience, son poids est mesuré par la différence entre les données capteurs du châssis à vide et ces mêmes données capteurs lorsque le conducteur est monté sur le simulateur. Connaissant ce poids, nous pouvons calculer les données corrigées du capteur de force pour tous les

angles de roulis en utilisant une relation que nous avons déduite lors du processus d'étalonnage. Un exemple des données utilisées pour l'étalonnage est illustré à la Figure 7.7.

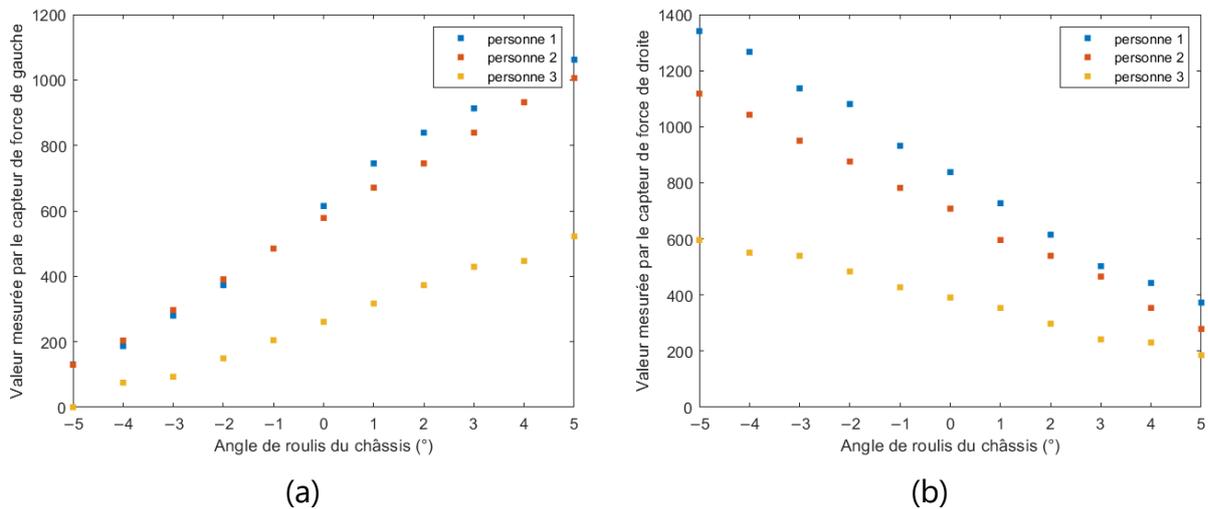


Figure 7.7 Données utilisées pour déterminer la loi de correction des mesures de force en fonction de l'angle de roulis du châssis : valeurs mesurées par les deux capteurs de force – (a) capteur de gauche et (b) capteur de droite – (valeurs sans unité codées sur 12 bits, allant de 0 à 4095) en fonction de l'angle de roulis du châssis (en °). Ces mesures ont été faites sans aucune action humaine sur le système

Le logigramme de la Figure 7.8 montre le processus de calcul du couple de roulis. La valeur obtenue est utilisée comme entrée du modèle de moto.

Comme pour le DDL de l'angle de guidon, le pilotage de la plate-forme mobile et en particulier de l'angle de roulis, nécessite de prendre en compte à la fois les actions du conducteur en couple de direction et en couple de roulis. Ces deux actions doivent être combinées pour créer un mouvement acceptable, c'est-à-dire cohérent physiquement et temporellement pour le conducteur.

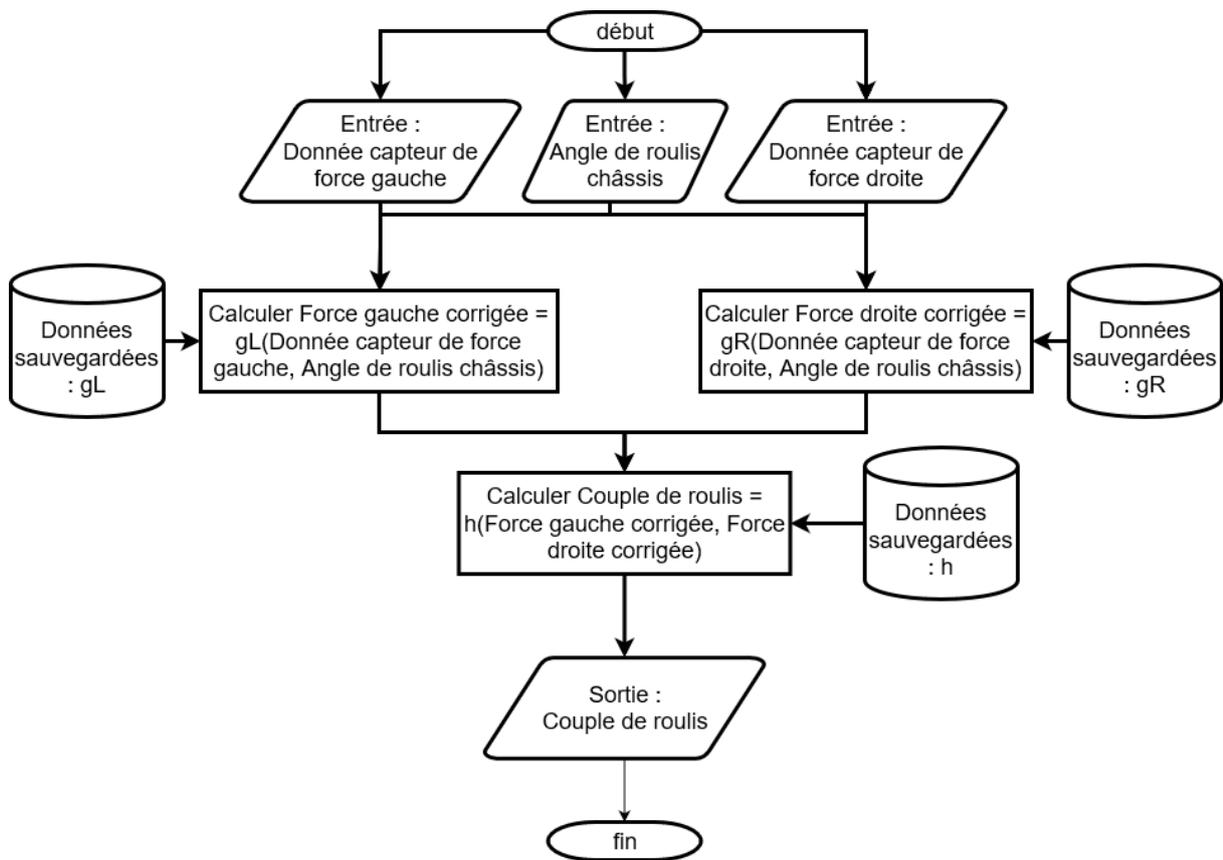


Figure 7.8 Logigramme du calcul du couple de roulis

7.5 RESULTATS

Les résultats que nous présentons concernant le système complet sont des résultats concernant la cohérence temporelle dans le système complet.

La Figure 7.9 montre que le simulateur produit bien un effet d'action-réaction entre :

1. une action du pilote, dans ce cas sous la forme d'une impulsion de couple de direction) ;
2. et la réaction de la moto simulée, dans ce cas sous la forme double d'un mouvement résultant du guidon (mais piloté par le modèle de véhicule, pas directement induit par l'action du conducteur) et de la plate-forme mobile.

L'effet n'est pas instantané : le système passe par plusieurs modèles pour calculer la réponse physique à restituer, notamment le modèle dynamique de la moto, le modèle de comportement du guidon et le modèle de comportement du châssis. Les résultats sont donc complexes à caractériser.

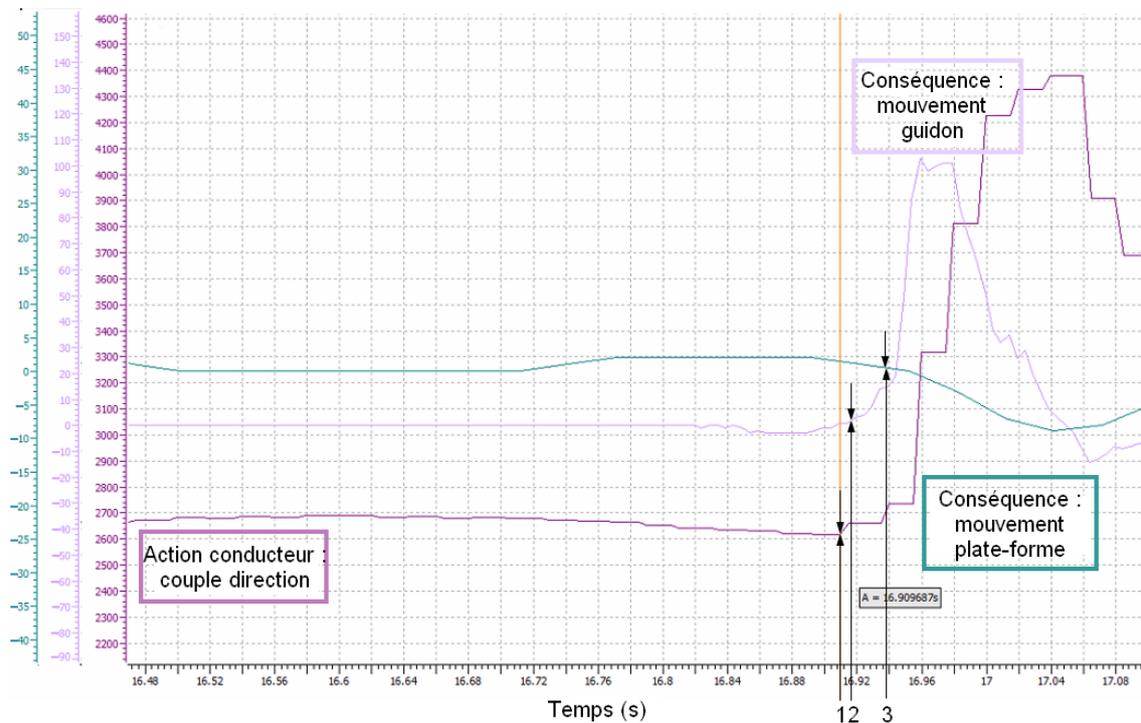


Figure 7.9 Mesures expérimentales illustrant l'effet action-réaction entre une action du pilote en termes de couple de direction, représentée ici par la valeur mesurée par la jauge de contrainte (valeur sans dimension sur 12 bits allant de 0 à 4095, en violet) et la réaction du véhicule virtuel, représentée ici par la vitesse réelle du guidon (valeur en centième de %/s, en lavande) et la différence entre les valeurs mesurées par le capteur de force gauche et droit du châssis (valeur sans dimension entre -123 et 123, en bleu-vert), dont une évolution signifie que le châssis bouge. Toutes les valeurs sont représentées en fonction du temps (écoulé depuis le début de l'expérience, en s)

Dans les résultats illustrés par la Figure 7.9, le stimulus d'entrée produit par le conducteur, c'est-à-dire l'impulsion de couple de direction, est initié à $t = 16,911\text{s}$ (marqueur 1 sur la Figure).

La vitesse courante du guidon (une sortie du modèle de véhicule et du modèle de guidon, en série) commence à changer à $t = 16,916\text{s}$ (marqueur 2 sur la Figure), c'est-à-dire 5 ms plus tard. Ce délai correspond aux contraintes de conception fixées pour le corps dynamique « colonne de direction ». La différence entre les valeurs mesurées par les capteurs de force gauche et droit, une image du mouvement de roulis du châssis, commence à changer à $t = 16,938\text{s}$ (marqueur 3 sur la Figure).

Cela signifie que le châssis commence à s'incliner de manière significative 27 ms après le stimulus d'entrée. Ce délai est plus long que les contraintes de conception du corps

dynamique « plate-forme mobile », c'est-à-dire l'actualisation de l'attitude du châssis à une période de 10 ms. Cependant, cela ne signifie pas que nos attentes ne sont pas respectées. En effet, le DDL de l'angle de roulis est significativement plus limité en amplitude que le DDL de l'angle de direction (pour éviter des ressentis négatifs pour le conducteur, comme la sensation de chute). Par conséquent, même si l'angle de roulis calculé par le modèle de moto commence à changer après 10 ms, un mouvement de roulis significatif du châssis (en sortie du modèle de véhicule et du modèle de plate-forme, en série) se produit plus tard. De plus, le modèle de moto prend en compte l'inertie du véhicule, qui influe également sur le délai dans la réponse.

Ces résultats sur la cohérence temporelle dans le système sont prometteurs. Il est encore nécessaire d'examiner les variables d'intérêt à la fois subjectives et objectives mesurées pendant l'expérimentation que nous avons mise en place, décrite dans le chapitre suivant. Parmi les autres résultats qui nous intéressent particulièrement, ceux qui nous paraissent les plus importants sont la contrôlabilité et l'acceptabilité de notre simulateur pour les conducteurs de moto.

7.6 CONCLUSION PARTIELLE ET PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT

Ce chapitre détaille nos travaux de conception et de développement pour l'amélioration de notre simulateur de conduite de moto, qui se positionnent dans le cadre de notre approche « centrée contrôlabilité ».

Nous avons divisé notre simulateur de conduite moto en deux corps dynamiques, la colonne de direction et la plate-forme mobile. Dans ce chapitre, nous avons détaillé en particulier, les choix d'instrumentation effectués (y compris les fréquences optimales de calcul et de transmission des données) pour chacun de ces deux corps afin de résoudre les différents problèmes soulevés à la fois par la complexité de la dynamique de la moto et la complexité de la construction d'un outil de simulation avec « humain-dans-la-boucle ».

Notre stratégie de conception qui consiste à bien comprendre la place centrale et les leviers de la contrôlabilité du simulateur de conduite par le conducteur, s'applique aux simulateurs de conduite moto mais peut à notre avis être bénéfique pour la conception d'autres types de simulateurs HUIL.

Le système de guidon motorisé à retour haptique que nous avons conçu et dont nous avons vérifié la contrôlabilité en première approche étant désormais complètement intégré à notre simulateur de conduite moto, nous avons fait tester nos travaux par un

conducteur de moto « expert » pour avoir un premier retour, avant de mener une expérimentation permettant de valider la contrôlabilité du système par un panel de conducteurs de moto d'horizons différents (âge, expérience de la conduite moto, type de moto conduite, etc.).

Il reste bien évidemment du travail à accomplir et de nouvelles pistes à explorer en termes d'instrumentation. Nous prévoyons notamment de mettre en œuvre des corrections supplémentaires des données capteurs en fonction de la vitesse de la moto simulée afin de compenser les effets dynamiques, tels que l'inertie de l'ensemble plate-forme dynamique et conducteur. Nous envisageons également de remplacer les bus CAN (1 Mbits/s) par des bus CAN FD (8 Mbits/s avec des trames de données de taille maximale plus importante) afin d'améliorer la fiabilité de la transmission, sachant que pour notre application, une quantité importante de données est transmise à une fréquence relativement élevée.

La conception du simulateur présenté ici, en plus de permettre un meilleur degré de contrôlabilité par le conducteur, est bien adaptée à nos études futures. En effet, de nombreux aspects sont configurables indépendamment, y compris le modèle de véhicule (implémenté sur un calculateur dédié) et les comportements des différents degrés de liberté du rendu du mouvement (gérés par d'autres calculateurs dédiés).

D'un point de vue « centré humain », l'expérimentation que nous avons menée au début du mois de décembre 2022 avait un objectif double : valider la contrôlabilité et l'acceptabilité du système complet, et étudier l'impact :

- de la complexité architecturale du simulateur par rapport à la complexité du modèle de véhicule,
- sur la sensation de présence et le contrôle de la trajectoire.

8 EXPERIMENTATION N°2 : ADEQUATION MODELE DE MOTO / STIMULI SENSORIELS : QUEL IMPACT SUR LA CONTROLABILITE D'UN SIMULATEUR MOTO ?

L'expérimentation que nous décrivons dans ce chapitre a pour objectif d'étudier l'impact sur la **contrôlabilité** d'un simulateur de conduite de la différence de **complexité** entre :

- le **modèle de véhicule implémenté**, d'une part ;
- et **l'architecture matérielle et logicielle** du simulateur, d'autre part.

Dans le contexte de ce travail, lorsque nous parlons de la contrôlabilité d'un simulateur de conduite, il s'agit de la contrôlabilité pour le **conducteur**.

La complexité d'un modèle de véhicule peut se mesurer par le nombre d'états qu'il est capable de modéliser. La complexité architecturale d'un simulateur de conduite peut, quant à elle, se mesurer par la qualité des dispositifs de contrôle permettant au conducteur d'agir sur le véhicule simulé, ainsi que par la qualité de la restitution de l'état de ce véhicule que cette architecture permet de fournir au conducteur.

Notre hypothèse de travail, qui a guidé les travaux décrits dans les chapitres précédents, et que ce projet d'expérimentation doit notamment permettre de tester, est que :

La contrôlabilité d'un simulateur de conduite par un conducteur ne peut être garantie que si les complexités du modèle de véhicule implémenté, d'une part, et de l'architecture du simulateur, d'autre part, sont de même ordre.

Autrement dit : si la complexité du modèle de véhicule implémenté n'est pas adaptée à la complexité de l'architecture du simulateur des points de vue matériel et logiciel, alors le simulateur de conduite n'est pas contrôlable. Dans cette logique, un meilleur contrôle du véhicule simulé serait donc obtenu lorsque la complexité du modèle et la complexité des stimuli sensoriels sont de même ordre. Un bon contrôle, respectant les attentes du conducteur, minimiserait les mouvements erratiques du véhicule virtuel, minimisant ainsi les probabilités qu'il ressente un sentiment de malaise, d'anxiété et qu'il souffre du mal du simulateur.

L'objectif de l'expérimentation est donc de mesurer et d'étudier les différences (si elles existent) dans les actions de contrôle du conducteur (c'est-à-dire les différences dans son

comportement de conduite) et de comparer les performances obtenues en termes de contrôle de trajectoire du véhicule simulé selon que :

1. le modèle dynamique de véhicule implémenté est en adéquation avec la complexité architecturale du simulateur ;
2. ou ne l'est pas.

Cette expérimentation a été approuvée par la Déléguée à la protection des données et par le Comité pour les Recherches impliquant la Personne Humaine (CRPH) de l'Université Gustave Eiffel en 2022.

8.1 METHODOLOGIE PREVUE

8.1.1 Participants

Nous recruterons trente motocyclistes ou conducteurs de scooter pour participer à cette expérimentation. Pour refléter le ratio femmes / hommes parmi les candidats au permis moto (catégorie A), c'est-à-dire 8,4% de femmes parmi les examinés au permis A1 et 16,0% au permis A2 en 2021 (Délégation à la sécurité routière, 2021), nous essayerons de recruter un groupe composé de 3 à 5 femmes et 25 à 27 hommes.

Les critères d'inclusion pour participer à l'expérimentation seront les suivants :

- les participants devront être âgés de 25 à 65 ans ;
- ils devront être titulaires du permis moto depuis plus de 3 ans ;
- ils devront conduire 3000 km / an ou plus ;
- ils devront conduire une moto ou un scooter de 400 cm³ ou plus ;
- ils devront avoir une vision normale ou corrigée à la normale (6 / 10), conformément au code de la route ;
- ils devront parler français (pour les besoins des questionnaires et de l'entretien prévus).

Conformément aux recommandations de l'Anses relatives à l'exposition aux technologies de réalité virtuelle et/ou de réalité augmentée (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, 2021), ne pourront pas participer à l'étude :

- les femmes enceintes ;
- les personnes souffrant du mal des transports et/ou du mal du simulateur ;
- les personnes souffrant d'épilepsie photosensible.

Les participants seront recrutés via les listes de diffusion de l'unité de recherche SATIE, de l'Université Paris-Saclay, de l'Université Gustave Eiffel et d'associations de motocyclistes et conducteurs de scooter (en Annexe 1, un document d'informations destiné aux personnes que l'on cherche à recruter par ces intermédiaires²). Tous les participants recevront une indemnité en compensation des contraintes et frais générés par leur participation à l'expérimentation.

8.1.2 Dispositif expérimental

L'expérimentation se déroulera sur le simulateur de moto localisé dans les locaux du groupe MOSS de l'unité de recherche SATIE, dans son état actuel d'avancement, tel que décrit dans les chapitres précédents.

Le retour haptique au niveau du guidon et/ou les mouvements de la plate-forme mobile seront activés ou désactivés suivant les modalités des variables à tester.

L'environnement virtuel utilisé consiste en une section de route de rase campagne représentative d'un environnement réel : une partie du réseau routier de la ville de Gif-sur-Yvette, dans laquelle se trouvent les locaux qui abritent le simulateur moto. Cette section de route comprend notamment plusieurs virages et deux ronds-points. Le réseau routier est constitué d'une zone de 8 km et est « rebouclé ».

8.1.3 Tâche

La situation expérimentale consistera en plusieurs sessions de conduite libre sur le circuit routier avec un trafic faible dans les deux sens de circulation.

Pour mettre le participant en situation, les expérimentateurs le chargeront d'aller chercher un proche sans contrainte temporelle spécifique, c'est-à-dire n'imposant pas de nécessité de conduire en sous- ou survitesse par rapport à la réglementation de la section de route. Nous demanderons à chaque participant de réaliser son déplacement et de gérer son interaction avec le trafic simulé de manière naturelle.

² L'expérimentation étant financée par l'Université Gustave Eiffel, les documents concernant l'expérimentation qui sont attachés en annexe portent le logo correspondant.

8.1.4 Plan expérimental

Les participants seront confrontés à deux modalités de complexité du modèle de moto implémenté et deux modalités de configuration de la plate-forme mobile du simulateur.

Le modèle de moto implémenté sera :

- dit « **simple** », par exemple, sans effet de contre-braquage. Pour cette modalité, nous avons développé un modèle fonctionnel de moto ;
- ou dit « **complexe** », par exemple, avec effet de contre-braquage.

Pour chacune de ces deux modalités, les participants effectueront un trajet avec deux configurations différentes de la plate-forme mobile (à plate-forme équivalente) :

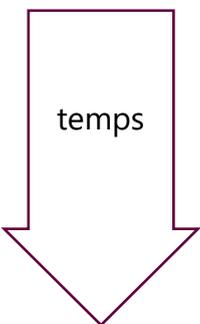
- **avec** rendu d'inclinaison ;
- ou **sans** rendu d'inclinaison.

Ce plan expérimental est intra-participants, c'est-à-dire que les participants seront confrontés aux deux modalités de complexité de modèle de moto implémenté, en conduisant le simulateur de conduite avec les deux modalités de configuration de la plate-forme mobile. Le plan expérimental peut donc se noter :

Complexité du modèle de moto (simple, complexe) x Configuration de la plate-forme du simulateur (avec rendu d'inclinaison, sans)

Les participants conduiront donc le simulateur durant $2 \times 2 = 4$ sessions de conduite. Les différentes variantes du plan expérimental seront présentées dans un ordre contrebalancé entre les participants. Un exemple est donné dans le Tableau 8.1.

Tableau 8.1 Exemple d'ordre des sessions de conduite pour le projet d'expérimentation



Session de conduite	Complexité du modèle de moto	Configuration de la plate-forme
N°1	Simple	Sans rendu d'inclinaison
N°2	Simple	Avec
N°3	Complexe	Sans
N°4	Complexe	Avec

8.1.5 Procédure

Un document d'informations décrivant l'expérimentation (disponible en Annexe 2) sera fourni aux motocyclistes et conducteurs de scooter manifestant leur intérêt pour participer à l'expérimentation. Il leur sera ensuite laissé au moins une semaine pour exprimer leur choix de participer ou non, temps nécessaire pour prendre connaissance des objectifs, du contenu et des modalités de réalisation de l'expérimentation et décider en connaissance de cause.

Pour chaque participant, l'expérimentation durera environ 2 h.

Chaque participant sera accueilli individuellement par les expérimentateurs qui lui expliqueront le déroulement de l'expérimentation. Le participant signera le formulaire de consentement (disponible en Annexe 3). Il passera ensuite un test d'équilibre en position unipodale. Pour passer ce test, il devra se tenir sur une seule jambe (de son choix). Le temps (limité à 30 s) pendant lequel le participant tiendra sur une seule jambe sera chronométré et enregistré.

Après avoir passé ce test d'équilibre, le participant conduira le simulateur moto pendant une phase de familiarisation qui consistera à conduire librement sur un réseau routier pendant environ 15 min, suivie d'une phase de repos d'environ 5 min.

Dans la phase d'expérimentation à proprement parler, le temps de conduite pour chaque participant sera d'environ 30 min. Après la phase de familiarisation, les expérimentateurs donneront à haute voix les instructions à respecter pendant les sessions de conduite au participant. Ensuite, pour les quatre variantes du plan expérimental : le participant réalisera son trajet, puis, après son trajet et un temps de repos, il remplira un exemplaire des questionnaires.

Après ces quatre sessions de conduite, le participant prendra part à un entretien avec les expérimentateurs. L'objectif de cet entretien sera de recueillir le ressenti général du participant au sujet de son expérience de conduite sur notre simulateur. Ce simulateur étant toujours un objet de recherche, nous nous intéressons à tout retour sur son acceptabilité pour les conducteurs et à toute piste d'amélioration qui pourrait se dégager de ce type de retours.

La procédure complète est représentée sous forme de frise chronologique par la Figure 8.1.

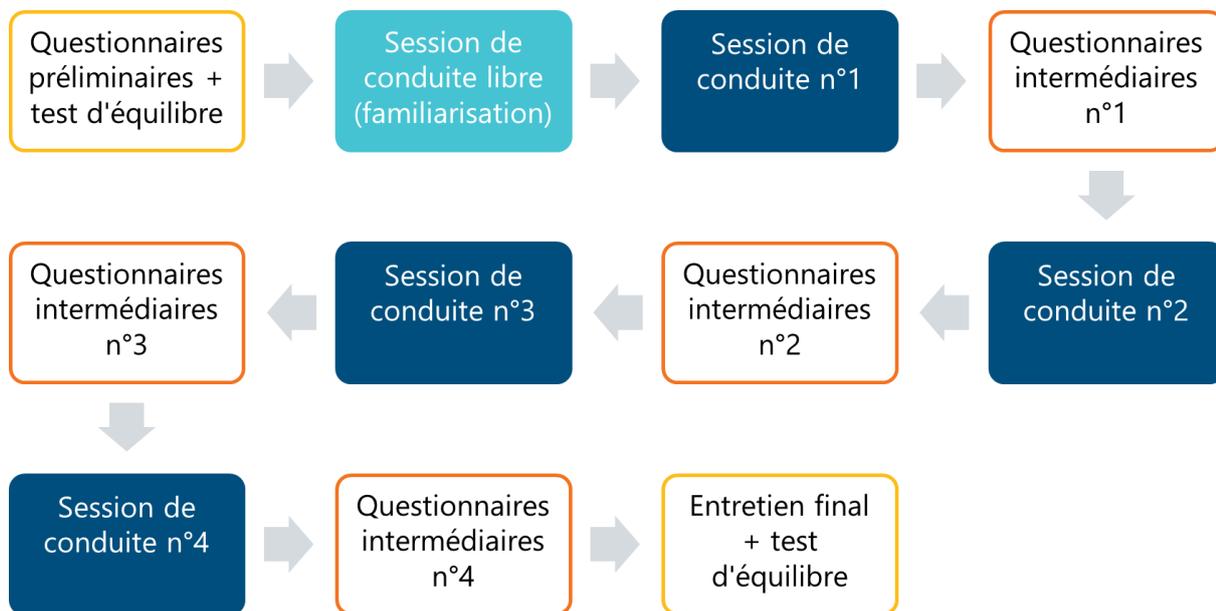


Figure 8.1 Frise chronologique représentant le déroulement du projet d'expérimentation pour un participant

Si un participant montre des symptômes de mal du simulateur, et ce à tout moment de l'expérimentation (phase de familiarisation ou phase de mesures), l'expérimentation sera arrêtée immédiatement (de l'initiative des expérimentateurs) et le participant pourra se reposer sur place. Chaque participant pourra également à tout moment arrêter l'expérimentation de sa propre initiative s'il en ressent le besoin.

Enfin, le participant devra de nouveau passer le test d'équilibre en position unipodale et le temps chronométré sera comparé à celui enregistré avant les sessions de conduite pour que les expérimentateurs vérifient son aptitude à repartir en toute sécurité. Si ce n'est pas le cas, le participant sera convié à se reposer sur place en attendant un retour à la normale.

8.2 RESULTATS ATTENDUS

L'expérimentation proposée analysera sur simulateur moto le comportement de conduite et les performances en termes de contrôle de trajectoire de conducteurs de deux-roues motorisés placés dans une situation sur route de rase campagne comportant des virages et deux ronds-points.

Les objectifs de cette expérimentation consistent à comparer les comportements 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).

Les mesures expérimentales prévues comprennent :

- des données démographiques :
 - âge et sexe,
 - expérience de conduite,
 - type de deux-roues utilisé (moto ou scooter, cylindrée),
 - kilométrage annuel ;
- des données sur le comportement de conduite pendant la phase de mesures : couples appliqués, positions et vitesses sur le réseau routier ;
- et des données subjectives recueillies :
 - par questionnaires en amont de l'expérimentation et pendant celle-ci (après chaque session de conduite),
 - lors d'un entretien semi directif post expérimentation portant sur le ressenti général du participant.

Les questionnaires utilisés seront des versions francophones des questionnaires suivants :

- questionnaires préliminaires :
 - *Motion Sickness Susceptibility Questionnaire (MSSQ)* (la version originale se trouve dans les travaux de Reason & Brand (Reason & Brand, 1975), nous utiliserons pour cette expérimentation la version révisée par Golding (Golding, 1998)) pour l'évaluation de la susceptibilité au mal des transports,
 - *Visually Induced Motion Sickness Susceptibility Questionnaire (VIMSSQ)* (Keshavarz et al., 2019) pour l'évaluation de la susceptibilité au mal du simulateur ;
- questionnaires intermédiaires :
 - *Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)* (Kennedy et al., 1993) pour l'évaluation du mal du simulateur,
 - *Presence Questionnaire (PQ)* (la version originale se trouve dans les travaux de Witmer & Singer (Witmer & Singer, 1998), nous utiliserons pour cette expérimentation la version révisée par Witmer, Jerome, & Singer (Witmer et al., 2005)) pour l'évaluation de l'état de présence,
 - *NASA-Task Load Index (NASA-TLX)* (Hart & Staveland, 1988) pour la mesure de la charge mentale.

Nous nous attendons à ce que les paires modèle dynamique / configuration de la plateforme du simulateur permettant le meilleur degré de contrôlabilité soient :

1. l'association d'un simulateur sans rendu d'inclinaison avec un modèle dynamique de moto dit « simple » ;
2. et l'association d'un simulateur avec rendu d'inclinaison avec un modèle dynamique de moto dit « complexe ».

Dans ces deux cas, les performances des participants devraient être meilleures en termes de contrôle de la trajectoire de leur moto virtuelle, leur sentiment de présence devrait être plus important, et leur ressenti général devrait être plus positif (ou moins négatif). La Figure 8.2 résume les résultats attendus pour ce projet d'expérimentation.

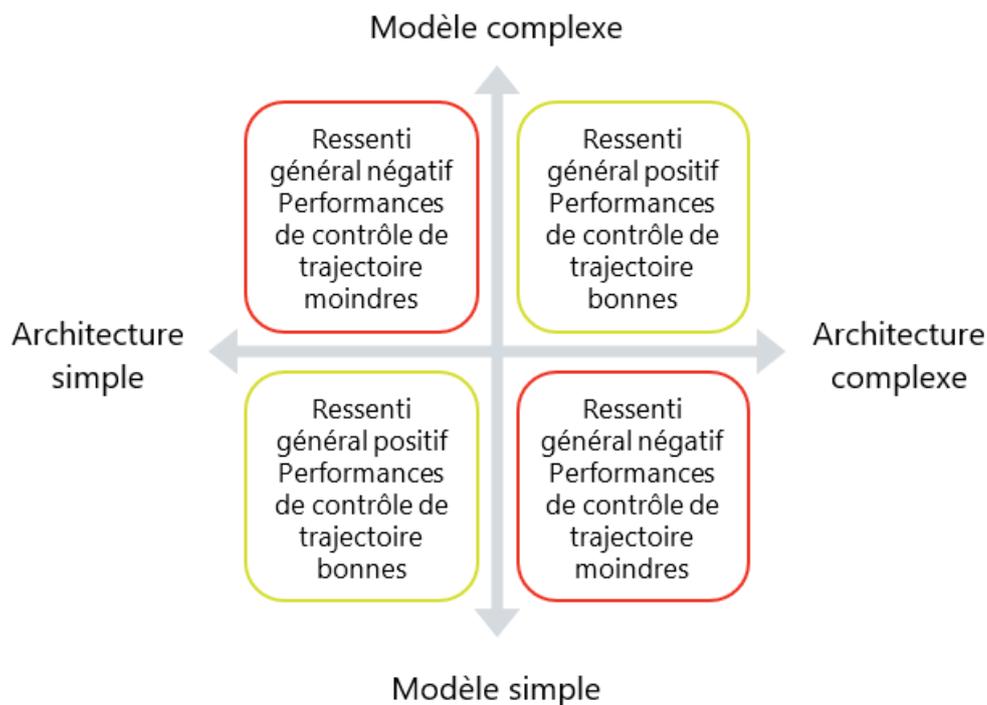


Figure 8.2 Représentation schématique des résultats attendus pour l'expérimentation

8.3 METHODOLOGIE ADOPTÉE

8.3.1 Participants

Vingt-quatre participants (2 femmes et 22 hommes) âgés de 25 à 65 ans (d'âge moyen $M = 48,5$ ans, écart-type $ET = 12,5$ ans) ont pris part à cette expérimentation. Tous avaient

une vue normale ou corrigée à la normale (6 / 10). Les participants étaient tous titulaires du permis moto (catégorie A) depuis plus de 3 ans (âge moyen du permis $M = 22,6$ ans, écart-type $ET = 12,8$ ans) et ont déclaré parcourir en moyenne $M = 11319$ km/an (avec un écart-type $ET = 8058,4$ km/an).

Les données relatives à trois participants (1 femme et 2 hommes), qui ont participé à la phase de pré-expérimentation, ont été exclues des analyses que nous présentons dans ce chapitre.

8.3.2 Dispositif expérimental

Pour donner suite à une pré-expérimentation, nous avons conclu que l'environnement virtuel que nous prévoyions d'utiliser était trop complexe (séquences de virages trop serrés). Nous avons décidé d'utiliser un environnement virtuel plus simple figurant un périphérique 2 x 2 voies. Ce réseau routier est constitué d'une zone d'une dizaine de kilomètres et est bouclé.

Nous nous focalisons dans cette expérimentation sur la manœuvre de changement de voie. Seul le mouvement d'inclinaison en roulis de la plate-forme mobile a été activé ou désactivé suivant les modalités des variables à tester ; le rendu haptique au niveau du guidon était toujours activé.

8.3.3 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, et ainsi pouvoir comparer les résultats entre les différents participants.

Dix obstacles – à savoir des voitures à l'arrêt – étaient placés sur la route, à distance égale les uns des autres (cette distance dépendant de la vitesse), 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 8.3.



Figure 8.3 Visuel de l'environnement routier dans lequel se déplaçaient les participants pendant notre expérimentation (vue tronquée)

8.3.4 Plan expérimental

Les participants ont été confrontés à deux modalités de complexité du modèle de moto implémenté et deux modalités de configuration de la plate-forme mobile du simulateur.

Le modèle de moto implémenté était :

- dit « simple ». Pour cette modalité, nous avons développé un modèle fonctionnel de moto. Ce modèle fonctionnel manipule 2 corps – le premier corps consistant en la colonne de direction et la roue avant, et le second en le châssis et la roue arrière – et 4 variables d'état, avec un effet d'un corps sur l'autre, l'effet de chacun des corps dépendant de la vitesse. Il reproduit l'effet de contrebraquage ;
- ou dit « complexe ». Pour cette modalité, nous avons utilisé le modèle de Meijaard (Référence) qui est un modèle manipulant 4 corps et 7 variables d'état.

Pour chacune de ces deux modalités, les participants ont effectué un trajet avec deux configurations différentes de la plate-forme mobile (à plate-forme équivalente) :

- **avec** rendu d'inclinaison ;
- ou **sans** rendu d'inclinaison.

Ce plan expérimental est intra-participants, c'est-à-dire que les participants ont été confrontés, pour chaque modalité de vitesse de la moto virtuelle, aux deux modalités de complexité de modèle de moto implémenté, en conduisant le simulateur de conduite avec les deux modalités de configuration de la plate-forme mobile. Le plan expérimental peut donc se noter :

Vitesse de déplacement de la moto virtuelle (basse, moyenne, haute) x Complexité du modèle de moto (simple, complexe) x Configuration de la plate-forme du simulateur (avec rendu d'inclinaison, sans)

Les participants ont donc conduit le simulateur durant $3 \times 2 \times 2 = 12$ 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 la stabilité d'une moto pour une tâche de type changement de voie : moyenne, haute, basse. A l'intérieur de ces différentes modalités de vitesse, les différentes variantes Complexité du modèle de moto x Configuration de la plate-forme du simulateur ont été présentées dans un ordre contrebalancé entre les participants.

8.3.5 Procédure

La procédure complète de l'expérimentation que nous avons mise en œuvre est représentée sous forme de frise chronologique par la Figure 8.4.

Les questionnaires préliminaires étaient ceux initialement prévus : *MSSQ* et *VIMSSQ*.

Étant donné l'augmentation du nombre de sessions de conduite par rapport à ce que nous avons initialement prévu, nous n'avons pas souhaité faire remplir aux participants un exemplaire des questionnaires intermédiaires entre chacune des 12 sessions. Nous avons donc décidé, à la place, de conduire un bref entretien après chaque variante du plan expérimental pour recueillir le ressenti général du participant, 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 ou de mal du simulateur, et de tout autre retour jugé pertinent par le participant.

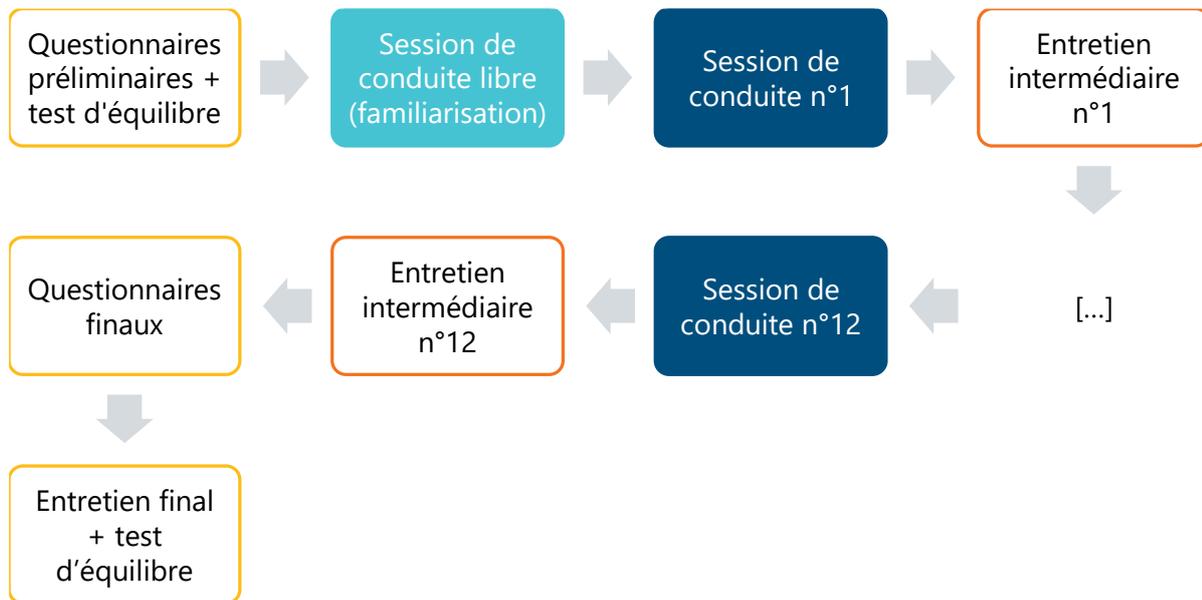


Figure 8.4 Frise chronologique représentant le déroulement de l'expérimentation pour un participant

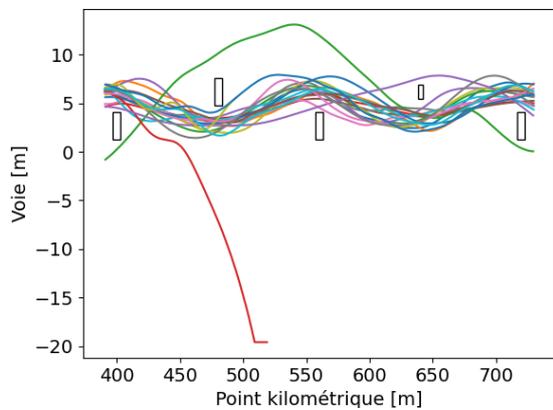
Après les 12 sessions de conduite, chaque participant devait remplir deux exemplaires des questionnaires finaux : SSQ, PQ, et NASA-TLX, pour les sessions de conduite pour lesquelles il avait jugé le comportement de la moto virtuelle le « moins naturel » et le « plus naturel ». Ces sessions de conduite étaient identifiables pour les expérimentateurs grâce aux retours faits pendant les entretiens intermédiaires.

8.4 RESULTATS OBTENUS ET DISCUSSION

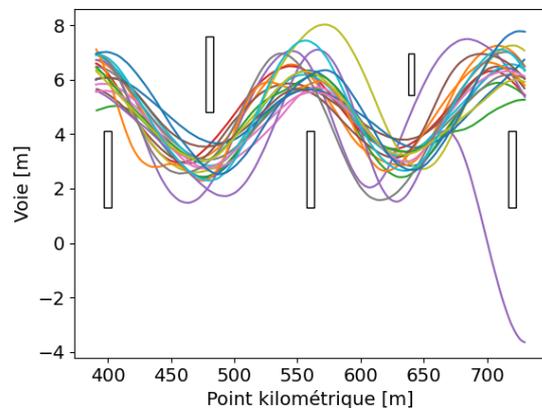
8.4.1 Mesures objectives

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.

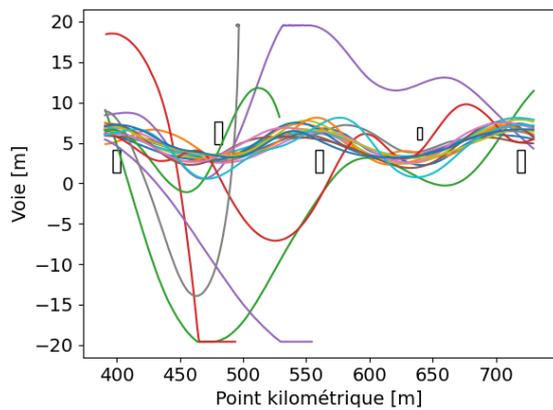
Les trajectoires effectuées par les participants étaient, pour une même vitesse de déplacement, très variables selon la variante expérimentale « Complexité du modèle de moto x Configuration de la plate-forme du simulateur », comme on peut le voir, pour la modalité « Vitesse moyenne », sur la Figure 8.5. On peut voir qu'un certain nombre de participants n'ont pas réussi à réaliser les manœuvres et sont sortis de la route.



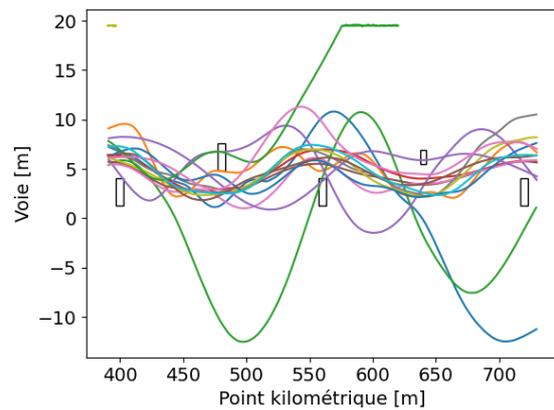
(a) Modèle fonctionnel x Sans rendu d'inclinaison



(b) Modèle fonctionnel x Avec rendu d'inclinaison



(c) Modèle de Meijaard x Sans rendu d'inclinaison



(d) Modèle de Meijaard x Avec rendu d'inclinaison

Figure 8.5 Trajectoires des participants de l'expérimentation dans les cas avec une vitesse de déplacement moyenne (72 km/h) : position latérale (voie en m) en fonction de la position longitudinale (point kilométrique en m) dans la zone des 5 premières voitures arrêtées (représentées par les rectangles noirs)

La première métrique que nous avons choisie pour l'analyse des données acquises que nous décrivons dans ce chapitre 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 8.12. Sur cette Figure, les sessions sont numérotées de la façon suivante :

- Notées 1 à 4, Vitesse basse x :
 1. Modèle fonctionnel x Sans rendu d'inclinaison,
 2. Modèle fonctionnel x Avec rendu d'inclinaison,
 3. Modèle de Meijaard x Sans rendu d'inclinaison,
 4. Modèle de Meijaard x Avec rendu d'inclinaison ;
- Notées 5 à 8, Vitesse moyenne x :
 5. Modèle fonctionnel x Sans rendu d'inclinaison,
 6. Modèle fonctionnel x Avec rendu d'inclinaison,
 7. Modèle de Meijaard x Sans rendu d'inclinaison,
 8. Modèle de Meijaard x Avec rendu d'inclinaison ;
- Notées 9 à 12, Vitesse haute x :
 9. Modèle fonctionnel x Sans rendu d'inclinaison,
 10. Modèle fonctionnel x Avec rendu d'inclinaison,
 11. Modèle de Meijaard x Sans rendu d'inclinaison,
 12. Modèle de Meijaard x Avec rendu d'inclinaison.

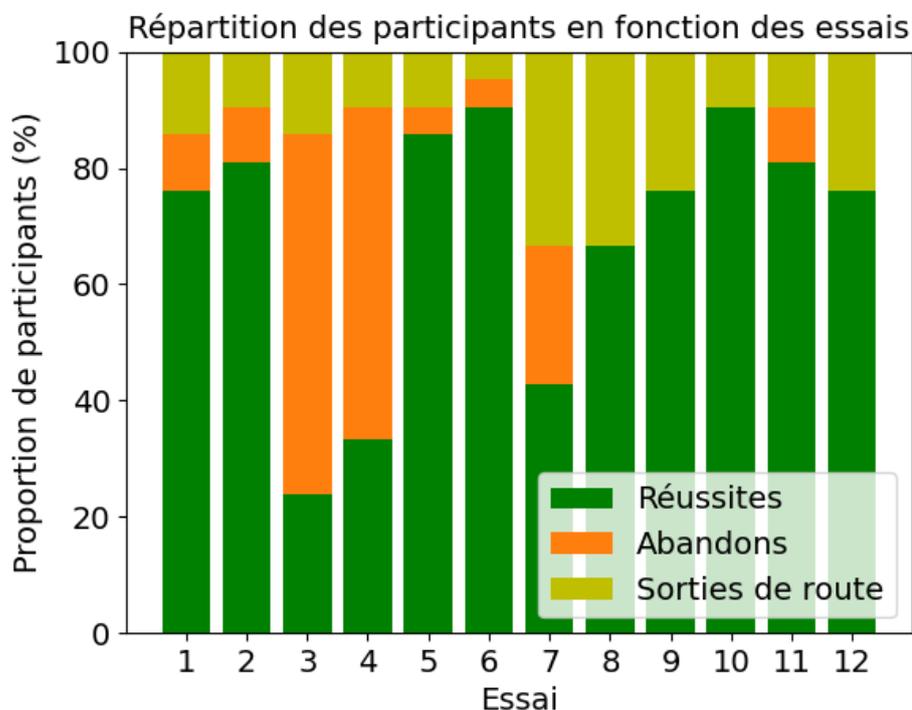
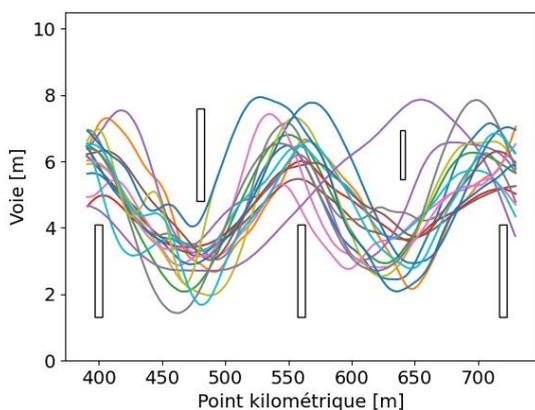


Figure 8.6 Taux d'échec et de réussite selon la session de conduite

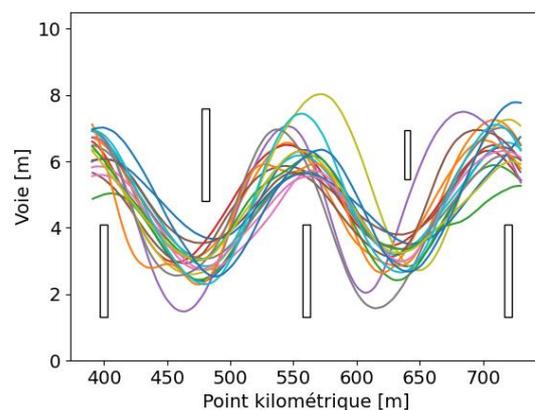
En analysant les taux d'échec et de réussite, on peut observer que, quelle que soit la vitesse de déplacement, les participants ont en moyenne éprouvé plus de difficultés à contrôler leur trajectoire au cours des sessions de conduite sans rendu d'inclinaison (notées avec des chiffres impairs sur la Figure). La seule comparaison pour laquelle ce n'était pas le cas était pour une vitesse de déplacement haute (108 km/h) lorsque le modèle implémenté était le modèle de Meijaard. 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 de Meijaard, en particulier en basse vitesse, c'est-à-dire dans le cas où la moto simulée est instable et donc plus difficile à contrôler.

En ne sélectionnant que les trajectoires sans sortie de route, les résultats sont tels que représentés par la Figure 8.7. Les trajectoires réalisées étaient plus variables dans les cas où le modèle implémenté était le modèle de Meijaard par rapport au modèle fonctionnel, et dans les cas où la plate-forme restituait l'inclinaison de la moto simulée par rapport à ceux où ce mouvement n'était pas restitué.

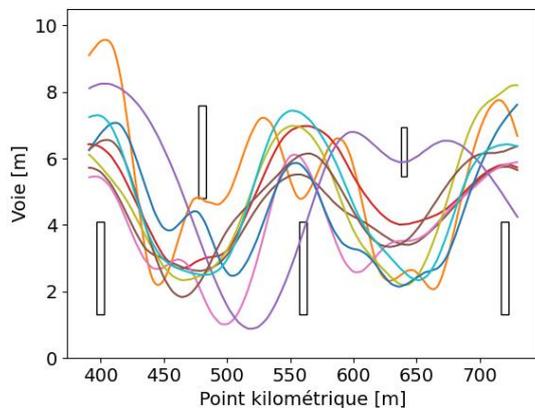
Ces observations ont tendance à montrer que le rendu de mouvement de roulis a un impact positif pour les deux modèles testés. Par ailleurs, dans la configuration testée du simulateur, le modèle fonctionnel permet aux participants un meilleur contrôle de leur trajectoire, et est donc mieux adapté.



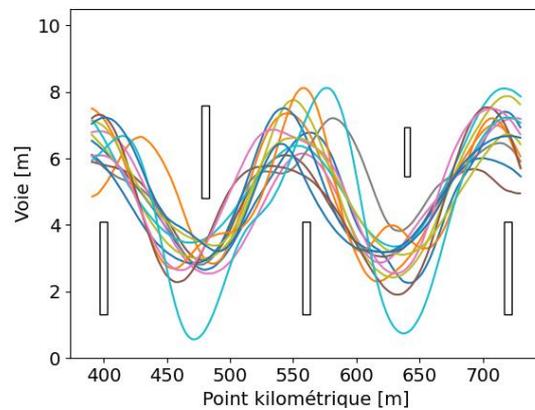
(a) Modèle fonctionnel x Sans rendu d'inclinaison



(b) Modèle fonctionnel x Avec rendu d'inclinaison



(c) Modèle de Meijaard x Sans rendu d'inclinaison



(d) Modèle de Meijaard x Avec rendu d'inclinaison

Figure 8.7 Trajectoires sans sortie de route des participants de l'expérimentation dans les cas avec une vitesse de déplacement moyenne (72 km/h) : position latérale (voie en m) en fonction de la position longitudinale (point kilométrique en m) dans la zone des 5 premières voitures arrêtées (représentées par les rectangles noirs)

Ce premier résultat s'appuie sur une première analyse des données. Des analyses additionnelles doivent être réalisées en sélectionnant notamment plus finement les trajectoires « réussies », en l'occurrence en éliminant celle où le participant est passé trop près d'une voiture arrêtée, et en analysant différentes métriques plus raffinées que celle discutée ici. Nous avons en particulier prévu d'analyser les différences des trajectoires effectuées par les participants avec une trajectoire « médiane » à une vitesse donnée. Pour ce faire, il faut cependant prendre en compte que différentes formes de trajectoire peuvent être considérées comme réussies (des trajectoires passant plus ou moins près des voitures arrêtées), et donc, par exemple, ne pas traiter une trajectoire déphasée comme une « mauvaise » trajectoire. Il faut également prendre en compte la proportion de données manquantes – celles des participants en échec pour une variante expérimentale donnée, qui peut être élevée selon la variante - dans l'analyse statistique des résultats. Nous avons enfin prévu de dresser une revue de l'état de l'art des mesures de « qualité » d'une trajectoire effectuée par un conducteur de deux-roues motorisé et d'analyser les métriques applicables au cas de notre expérimentation.

Les analyses encore à faire concernent également les autres mesures objectives dont nous disposons, et en particulier le couple de direction et le couple de roulis appliqués par les participants pendant leur déplacement. Un exemple est donné en Figure 8.8.

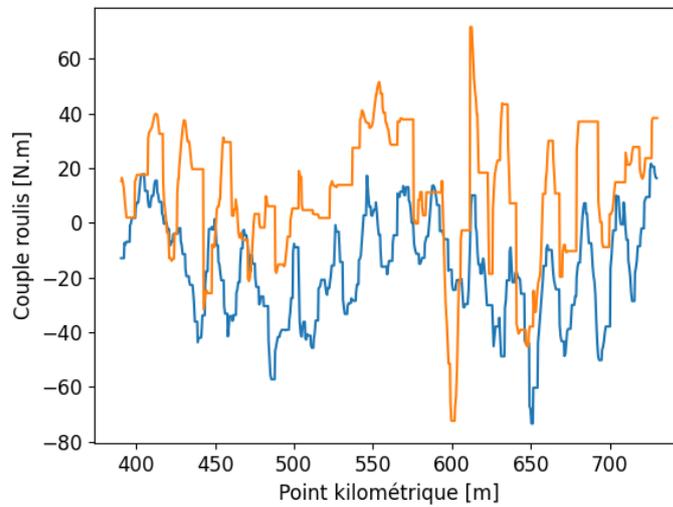


Figure 8.8 Couple de roulis exercé par 2 participants pendant leur déplacement dans le cas de la variante expérimentale : « Vitesse moyenne x Modèle fonctionnel x Avec rendu d'inclinaison », en fonction de la position longitudinale (point kilométrique en m) et dans la zone des 5 premières voitures arrêtées (représentées par les rectangles noirs)

8.4.2 Entretiens

Nous avons représenté les verbalisations des participants pendant les entretiens sous la forme de nuages de mots, 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 dans la Figure 8.9.



(a) Modèle fonctionnel x Sans rendu d'inclinaison



(b) Modèle fonctionnel x Avec rendu d'inclinaison



(c) Modèle de Meijaard x Sans rendu d'inclinaison



(d) Modèle de Meijaard x Avec rendu d'inclinaison

Figure 8.9 Nuages de mots reportant les retours faits par les participants pendant les entretiens, pour les cas avec une vitesse de déplacement moyenne (72 km/h)

L'analyse des retours des participants, représentés de cette manière, aboutit à plusieurs observations :

- sans rendu d'inclinaison par la plate-forme du simulateur, la moto virtuelle était en général jugée difficilement contrôlable, voire impossible à contrôler, par les participants, 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 identifié un comportement qui n'était pas naturel de la moto virtuelle dans les cas sans rendu d'inclinaison, notamment en termes de ce qu'ils ressentaient au niveau du corps (par opposition à ce qu'ils ressentent 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 plus contrôlable, et ce notamment du fait d'un comportement qui ne leur semblait pas naturel du guidon dans le cas « Modèle de Meijaard x Avec rendu d'inclinaison ».

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

8.4.3 Mesures subjectives

Les scores SSQ, PQ et NASA-TLX ont été analysés en utilisant des tests t pour échantillons appariés pour comparer les scores déclarés par les participants pour la session de conduite au cours de laquelle le comportement de la moto virtuelle était le « moins éloigné de la réalité » et le « plus proche de la réalité », respectivement. Le seuil de signification statistique utilisé pour les analyses était $\alpha = 0,05$ (5%).

Le test des scores d'état de présence a révélé un score significativement plus faible dans le cas le plus éloigné (score dans ce cas : $M = 99,67$, $ET = 19,87$, score dans le cas le plus proche : $M = 113,10$, $ET = 21,94$) : $t(20) = 3,02$, $p = 0,003$, avec une taille d'effet moyenne $d = 0,658$. Ces résultats sont présentés par la Figure 8.10.

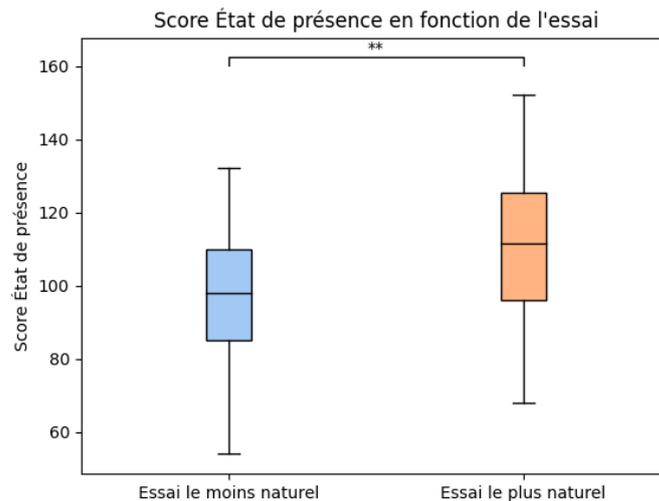


Figure 8.10 Scores d'état de présence (résultat des questionnaires Presence Questionnaire) pour les sessions de conduite au cours desquelles le comportement de la moto virtuelle était respectivement jugé le moins et le plus réaliste (** : $p < 0,01$)

De plus, les tests des scores aux sous-échelles NASA-TLX, qui sont présentés par la Figure 8.11, ont révélé :

- un score de « pression mentale » (abrégé PM sur la Figure) significativement plus élevé dans le cas le plus éloigné (score dans ce cas : $M = 77,62$, $ET = 11,79$, score dans le cas le plus proche : $M = 64,29$, $ET = 28,03$) : $t(20) = 2,29$, $p = 0,017$, avec une taille d'effet moyenne $d = 0,499$;
- un score de « pression physique » (abrégé PP sur la Figure) significativement plus élevé dans le cas le plus éloigné (score dans ce cas : $M = 49,52$, $ET = 26,36$, score dans le cas le plus proche : $M = 31,90$, $ET = 23,79$) : $t(20) = 3,25$, $p = 0,002$, avec une taille d'effet élevée $d = 0,708$;
- pas de différence significative dans les scores de « pression temporelle » (abrégé PT sur la Figure), c'est-à-dire $p > 0,05$;
- un score de « performance » (abrégé P sur la Figure) significativement plus faible dans le cas le plus éloigné (score dans ce cas : $M = 33,81$, $ET = 25,59$, score dans le

cas le plus proche : $M = 63,33$, $ET = 22,66$) : $t(20) = 4,17$, $p < 0,001$, avec une taille d'effet élevée $d = 0,909$;

- un score d'« effort » (abrégé E sur la Figure) significativement plus élevé dans le cas le plus éloigné (score dans ce cas : $M = 62,86$, $ET = 21,94$, score dans le cas le plus proche : $M = 38,57$, $ET = 27,44$) : $t(20) = 3,43$, $p = 0,002$, avec une taille d'effet élevée $d = 0,747$;
- un score de « frustration » (abrégé F sur la Figure) significativement plus élevé dans le cas le plus éloigné (score dans ce cas : $M = 51,43$, $ET = 33,21$, score dans le cas le plus proche : $M = 22,38$, $ET = 25,08$) : $t(20) = 4,25$, $p < 0,001$, avec une taille d'effet élevée $d = 0,928$.

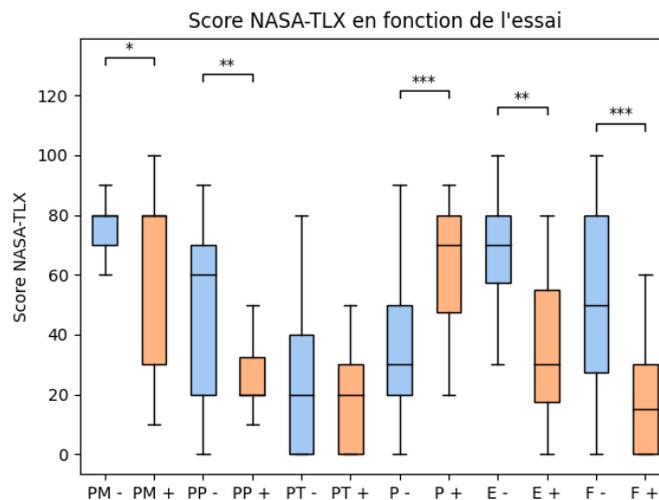


Figure 8.11 Scores aux sous-échelles des questionnaires NASA-TLX pour les sessions de conduite au cours desquelles le comportement de la moto virtuelle était respectivement jugé le moins (noté -) et le plus réaliste (noté +) (* : $p < 0,05$, ** : $p < 0,01$ et *** : $p < 0,001$)

Enfin, le test des scores de mal du simulateur a révélé un score significativement plus élevé dans le cas le plus éloigné (score dans ce cas : $M = 7,71$, $ET = 5,00$, score dans le cas le plus proche : $M = 3,62$, $ET = 3,4$) : $t(20) = 4,32$, $p < 0,001$, avec une taille d'effet élevée $d = 0,942$. Ces résultats sont présentés par la Figure 8.12.

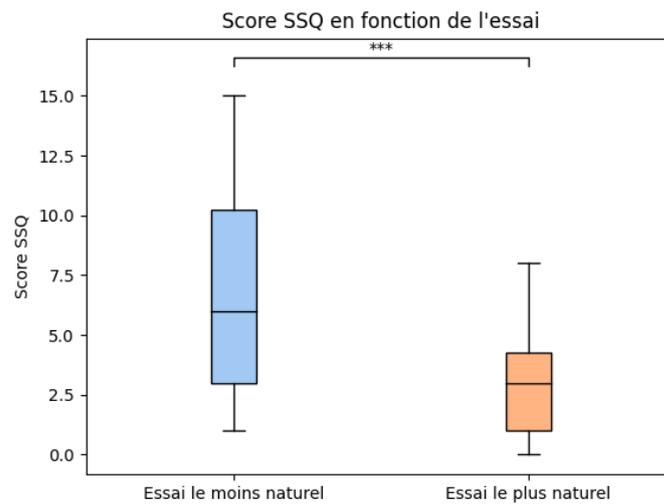


Figure 8.12 Scores de mal du simulateur (résultat des questionnaires Simulator Sickness Questionnaire) pour les sessions de conduite au cours desquelles le comportement de la moto virtuelle était respectivement jugé le moins et le plus réaliste (***) : $p < 0,001$

Cette première analyse des résultats subjectifs montre que pour notre expérimentation et la complexité du simulateur utilisé, le modèle fonctionnel est le mieux adapté : c'est celui qui permet une bonne contrôlabilité du véhicule virtuel. Pour ce modèle, le comportement du véhicule virtuel est en général perçu comme naturel, réaliste, correspondant aux attentes du conducteur telles qu'issues de son expérience de conduite de moto réelle. Cette bonne contrôlabilité du simulateur induit un sentiment de présence plus élevé, des scores de charge relatives à la tâche moins élevés, et minimise le mal du simulateur.

8.5 CONCLUSION PARTIELLE ET PERSPECTIVES

Les premières analyses des résultats de notre expérimentation ont tendance à confirmer notre hypothèse de travail : si la complexité du modèle de véhicule implémenté est adaptée à la complexité de l'architecture du simulateur des points de vue matériel et logiciel, alors le simulateur de conduite est contrôlable et le mal du simulateur est minimisé. Un bon contrôle, respectant les attentes du conducteur, minimise les mouvements erratiques du véhicule virtuel, et ainsi le sentiment de malaise, d'anxiété et le mal du simulateur.

A l'issue des travaux décrits dans ce manuscrit, notre simulateur de conduite est contrôlable pour des vitesses allant de basse, voire très basse (entre 15 et 36 km/h), à

haute (108 km/h), y compris pour une vitesse moyenne (72 km/h) et pour un modèle de complexité moyenne, le modèle fonctionnel que nous avons développé et une architecture à deux degrés de liberté : roulis et angle de guidon. A noter qu'au cours de l'expérimentation, 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 une vitesse régulée à 15 km/h, dans la configuration « Modèle fonctionnel x Avec rendu d'inclinaison », 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 supplémentaires et 71% d'entre eux ont réussi à effectuer une manœuvre de demi-tour, soit environ 47% de tous ceux qui ont 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.

Dans l'expérimentation que nous venons de présenter, nous avons traité un cas relativement simple qui est celui du changement de voie, en mettant en œuvre le rendu du roulis de la moto simulée par la plate-forme, ce pour des vitesses de déplacement variées. Nous prévoyons, en utilisant la méthode de développement centrée sur la contrôlabilité pour le conducteur décrite dans ce manuscrit, de mener d'autres expérimentations mettant en œuvre d'autres degrés de liberté de la plate-forme mobile de notre simulateur, en particulier le tangage et le lacet. Dans la mesure où nous prévoyons d'exploiter un nombre plus important de degrés de liberté, nous obtiendrons une architecture du simulateur plus complexe. Se posera alors la question de la complexité de modèle adaptée à cette nouvelle architecture. Le modèle fonctionnel qui a pour le moment donné les meilleurs résultats ne sera alors probablement plus le mieux adapté et il faudra alors implémenter un modèle tel que le modèle de Meijaard, ou le modèle utilisé par BikeSim qui est issu des travaux de l'Université de Padoue.

Nous espérons que cette nouvelle architecture permettra aux conducteurs de conduire pour des situations routières plus complexes et plus réalistes telles que des séquences de virage (par exemple la route « des 17 tournants » qui se situe dans le département des Yvelines) ou des situations péri-urbaines (par exemple la section de route de rase campagne de la ville de Gif-sur-Yvette que nous envisagions initialement) et urbaines.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les conducteurs moto sont surreprésentés dans l'accidentalité routière ; en France, un conducteur moto a environ 25 fois plus de risque d'être tué qu'un conducteur automobile (Conseil National de la Sécurité Routière - Comité des Experts, 2020). L'étude des comportements des conducteurs moto est donc un enjeu important. Du fait des risques encourus, une solution utilisée par les chercheurs est l'étude des comportements en utilisant des simulateurs de conduite.

Toutefois, la simulation de conduite moto est complexe car la conduite d'une moto est complexe : pour contrôler sa trajectoire, le conducteur interagit en permanence avec son véhicule. Cette interaction est nécessaire du fait du caractère naturellement instable des deux-roues.

Comme pour les simulateurs automobiles, un problème récurrent concerne l'occurrence du phénomène dit du « mal du simulateur ». Cette question est particulièrement problématique car les résultats obtenus sont biaisés : d'abord un biais de sélection, du fait de la limitation de la population observée à la population non sensible au mal du simulateur, ensuite un biais de mesure, parce qu'un conducteur qui ne se sent pas en contrôle et souffre du mal du simulateur risque d'avoir un comportement de conduite altéré par rapport à celui qu'il aurait dans une situation où il se sentirait en contrôle et « à l'aise ».

Notre thèse est que le mal du simulateur peut être induit par un manque de contrôlabilité du simulateur : l'être humain dans la boucle ne parvient pas à contrôler le véhicule virtuel du fait d'incohérences entre ses actions et le comportement du véhicule virtuel, qui ne correspond pas à ses attentes. Nous défendons l'hypothèse que ces incohérences proviennent souvent de l'usage combiné d'un modèle de véhicule et d'une architecture de simulateur de complexités trop différentes.

Pour démontrer notre hypothèse, nous avons fait évoluer le système de pilotage du guidon d'un simulateur de conduite de moto préexistant, et conçu une architecture électronique distribuée en charge du calcul des modèles de véhicule, de plateforme, et de retour d'effort au guidon. Dans une première étape, nous avons développé un système « Preuve de Concept » pour le retour d'effort au guidon et validé ce système et nos hypothèses par le biais d'une expérimentation avec une vingtaine de participants. Nous avons, dans une deuxième étape, intégré notre retour d'effort au guidon au prototype de

simulateur moto, puis raffiné le modèle de véhicule préexistant. Ces étapes ont été validées expérimentalement par un conducteur « expert ».

Nous avons enfin développé un modèle de véhicule simplifié et conçu un protocole d'expérimentation que nous avons soumis à un comité d'éthique. Cette expérimentation a eu pour objectif de mettre en évidence l'intérêt pour le contrôle du simulateur moto par des conducteurs, d'adapter la complexité du modèle de véhicule à la capacité de l'architecture du simulateur à restituer au conducteur le comportement du véhicule.

Cette expérimentation s'est tenue en décembre 2022. Les premières analyses de ses permettent de confirmer cette hypothèse de travail.

Les premières analyses des résultats obtenus tendent à valider notre hypothèse : notre simulateur de conduite, à l'issue des travaux décrits dans ce manuscrit, est contrôlable par un panel de conducteurs de deux-roues motorisés, et ce pour des vitesses allant de basse, voire très basse (entre 15 et 36 km/h), à haute (108 km/h). Ces résultats sont obtenus avec un modèle fonctionnel de complexité moyenne, modèle fonctionnel que nous avons développé, et une architecture à deux degrés de liberté : roulis et angle de guidon. Une manœuvre de demi-tour en utilisant uniquement la gestion de l'équilibre (et pas d'accélération par exemple), qui est une manœuvre demandant une dextérité particulière, a été réalisée par une proportion non négligeable des participants dans le cadre de l'expérimentation mise en œuvre, ce que nous considérons comme un résultat encourageant.

Un verrou encore à lever concerne la capacité du simulateur à permettre d'étudier des situations urbaines de type démarrage au feu et tourne à droite, qui sont des situations à basse vitesse. Ces manœuvres demandent une dextérité particulière, déjà difficile à acquérir pour les débutants dans la réalité, et difficiles à restituer sur simulateur de conduite, mais qui seraient particulièrement utiles pour les études de comportement car une majorité des accidents se passe aux carrefours (Federation of European Motorcyclists' Associations, 2016; Martensen & Roynard, 2013). Lever ce verrou démontrerait en effet une très bonne contrôlabilité du simulateur.

Pour permettre au simulateur d'être utilisé pour étudier de telles manœuvres il nous faudra appliquer l'approche que nous proposons ici aux autres degrés de liberté de notre simulateur : le tangage, le lacet, et la fonctionnalité pseudo-haptique implémentée au niveau de la colonne de direction. Les mouvements de ces degrés de liberté sont en effet fortement liés aux accélérations et freinages de la moto simulée, et la gestion de ces deux éléments est une part non négligeable de la tâche de contrôle de la trajectoire par le

conducteur. Lorsque nous mettrons en œuvre ces degrés de liberté additionnels, cela posera la question de la validité du point d'équilibre trouvé entre la complexité du modèle fonctionnel et la complexité de l'architecture du simulateur avec rendu du roulis et angle de guidon. Nous anticipons qu'il faudra rechercher un nouveau point d'équilibre, et ce en recherchant un modèle de moto de complexité adaptée à l'architecture raffinée de notre simulateur.

Au vu de nos résultats encourageants montrés par ce travail de thèse, nous postulons que l'approche proposée est généralisable à d'autres types de simulateurs de conduite et très probablement à d'autres simulateurs « humain-dans-la-boucle ».

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111-149. <https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734898>
- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. (2021). *AVIS et RAPPORT de l'Anses relatifs aux effets sanitaires potentiels liés à l'exposition aux technologies utilisant la réalité augmentée et la réalité virtuelle* (Saisine n°2017-SA-0076).
- Arioui, H., Nehaoua, L., Hima, S., Séguy, N., & Espié, S. (2010). Mechatronics, Design, and Modeling of a Motorcycle Riding Simulator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 15(5), 805-818. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2009.2035499>
- Attig, C., Rauh, N., Franke, T., & Krems, J. F. (2017). System Latency Guidelines Then and Now – Is Zero Latency Really Considered Necessary? In D. Harris (Éd.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: Cognition and Design* (p. 3-14). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58475-1_1
- Benedetto, S., Lobjois, R., Faure, V., Dang, N.-T., Pedrotti, M., & Caro, S. (2014). A comparison of immersive and interactive motorcycle simulator configurations. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 23, 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2013.12.020>
- Berthoz, A. (1997). *Le Sens du mouvement*. Odile Jacob.
- Berthoz, A. (2009). *La Simplexité*. Odile Jacob.
- Berthoz, A., Pavard, B., & Young, L. R. (1975). Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection) basic characteristics and visual-vestibular interactions. *Experimental Brain Research*, 23(5), 471-489. <https://doi.org/10.1007/BF00234916>
- Bertin, R. J. V., Guillot, A., Collet, C., Vienne, F., Espié, S., & Graf, W. (2004). *Objective measurement of simulator sickness and the role of visual-vestibular conflict situations: A study with vestibular-loss (a-reflexive) subjects [Poster]*. Society for Neurosciences 34th Annual Meeting, San Diego, CA, USA.
- Bittner, A. C., Gore, B. F., & Hooey, B. L. (1997). Meaningful Assessments of Simulator Performance and Sickness: Can't Have One without the Other? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 41(2), 1089-1093. <https://doi.org/10.1177/107118139704100280>
- Boets, S., Espié, S., Delhayé, A., & Teuchies, M. (2020). Impact of a Head-Up Display on motorcycle riding: A pilot study using a motorcycle riding simulator. *Proceedings of the 13th International Motorcycle Conference (IMC 2020)*, 95-106.
- Bonnet, C. T., Faugloire, E., Riley, M. A., Bardy, B. G., & Stoffregen, T. A. (2006). Motion

- sickness preceded by unstable displacements of the center of pressure. *Human Movement Science*, 25(6), 800-820. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.03.001>
- Bos, J. E. (2011). Nuancing the relationship between motion sickness and postural stability. *Displays*, 32(4), 189-193. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2010.09.005>
- Bos, J. E., & Bles, W. (2002). Theoretical considerations on canal–otolith interaction and an observer model. *Biological Cybernetics*, 86(3), 191-207. <https://doi.org/10.1007/s00422-001-0289-7>
- Bos, J. E., Bles, W., & Groen, E. L. (2008). A theory on visually induced motion sickness. *Displays*, 29(2), 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.09.002>
- Bos, J. E., MacKinnon, S. N., & Patterson, A. (2005). Motion sickness symptoms in a ship motion simulator: Effects of inside, outside, and no view. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 76(12), 1111-1118.
- 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>
- Bougard, C., VanBeers, P., Sauvet, F., Drogou, C., Guillard, M., Dorey, R., Gomez-Merino, D., Dauguet, J., Takillah, S., Espié, S., Chennaoui, M., & Léger, D. (2020). Motorcycling performance and sleepiness during an extended ride on a dynamic simulator: Relationship with stress biomarkers. *Physiological Measurement*, 41(10), 104004. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/abb75e>
- Bruck, L., Haycock, B., & Emadi, A. (2021). A Review of Driving Simulation Technology and Applications. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2, 1-16. <https://doi.org/10.1109/OJVT.2020.3036582>
- Burton, A., & Radford, J. (1978). *Thinking in perspective: Critical essays in the study of thought processes*. Methuen.
- Cameron, B., de la Malla, C., & López-Moliner, J. (2014). The role of differential delays in integrating transient visual and proprioceptive information. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00050>
- Casali, J. G., & Wierwille, W. W. (1986). Potential design etiological factors of simulator sickness and a research simulator specification. *Transportation Research Record*, 1059, 66-74.
- Cavallo, V., & Laurent, M. (1988). Visual information and skill level in time-to-collision estimation. *Perception*, 17(5), 623-632. <https://doi.org/10.1068/p170623>
- Cavallo, V., Mestre, D., & Berthelon, C. (1997). Time-to-collision judgements: Visual and spatio-temporal factors. *Traffic and Transport Psychology. Theory and Application*.
- Celiberti, F., Grottoli, M., Di Gesu, M., Gubitosa, M., & Donders, S. (2016). An Overview on the MOTORIST Motorcycle Simulator [Poster]. *Proceedings of the Driving*

- Simulation Conference Europe 2016 VR (DSC 2016).*
- Chiyoda, S., Yoshimoto, K., & Kawasaki, D. (2000). Development of a motorcycle simulator using parallel manipulator and head mounted display. *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2000 (DSC 2000).*
- Chiyoda, S., Yoshimoto, K., Kawasaki, D., Murakami, Y., & Sugimoto, T. (2002). Development of a motorcycle simulator using parallel manipulator and head mounted display. *Proceedings of the 6th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2002)*, 599-602.
- Clarke, A. H., Clarke, M. C., & Scherer, H. (1996). The influence of vestibular disorder on driving behaviour. *Vision in vehicles*, 5, 41-48.
- Commission européenne. (2020). *Facts and Figures Motorcyclists and moped riders. European Road Safety Observatory.* Commission européenne - Direction générale des transports.
- Conseil National de la Sécurité Routière - Comité des Experts. (2020). *Sécurité des deux-roues motorisés: Vers un usage adapté à leur vulnérabilité.* Observatoire national interministériel de la sécurité routière.
- Cossalter, V. (2006). *Motorcycle Dynamics.* Lulu.com.
- Cossalter, V., Doria, A., & Lot, R. (1999). Steady Turning of Two-Wheeled Vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 31(3), 157-181. <https://doi.org/10.1076/vesd.31.3.157.2013>
- Cossalter, V., & Lot, R. (2002). A Motorcycle Multi-Body Model for Real Time Simulations Based on the Natural Coordinates Approach. *Vehicle System Dynamics*, 37(6), 423-447. <https://doi.org/10.1076/vesd.37.6.423.3523>
- Cossalter, V., Lot, R., & Massaro, M. (2011). An advanced multibody code for handling and stability analysis of motorcycles. *Meccanica*, 46(5), 943-958. <https://doi.org/10.1007/s11012-010-9351-7>
- Cossalter, V., Lot, R., Massaro, M., & Sartori, R. (2011). Development and validation of an advanced motorcycle riding simulator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 225(6), 705-720. <https://doi.org/10.1177/0954407010396006>
- Cossalter, V., Lot, R., & Rota, S. (2010). Objective and subjective evaluation of an advanced motorcycle riding simulator. *European Transport Research Review*, 2(4), Art. 4. <https://doi.org/10.1007/s12544-010-0041-2>
- Crevecoeur, F., Munoz, D. P., & Scott, S. H. (2016). Dynamic Multisensory Integration: Somatosensory Speed Trumps Visual Accuracy during Feedback Control. *Journal of Neuroscience*, 36(33), 8598-8611. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0184-16.2016>
- Curry, R., Artz, B., Cathey, L., Grant, P., & Greenberg, J. (2002). Kennedy SSQ results: Fixed vs. Motion-base Ford simulators. *Proceedings of the Driving Simulation Conference*

Europe 2002 (DSC 2002), 289-300.

- Délégation à la sécurité routière. (2021). *Année 2021: Bilan des examens du permis de conduire*. Délégation à la sécurité routière - Sous-direction de l'éducation routière et du permis de conduire - Bureau de la réglementation du permis de conduire et de l'organisation des examens.
- Denton, G. G. (1966). Equipment note. 'Moving road simulator'—A machine suitable for the study of speed phenomena including motion after-effect. *Ergonomics*, 9(6), 517-520. <https://doi.org/10.1080/00140136608964417>
- Drosdol, J., Käding, W., & Panik, F. (1986). The Daimler-Benz Driving Simulator New Technologies Demand New Instruments. *Vehicle System Dynamics*, 15(sup1), 44-57. <https://doi.org/10.1080/00423118608969125>
- Drosdol, J., & Panik, F. (1985). The Daimler-Benz Driving Simulator A Tool for Vehicle Development. *SAE Transactions*, 94, 981-997.
- Eichenberg, C. (2007). Einsatz von „virtuellen Realitäten“ in der Psychotherapie. *Psychotherapeut*, 52(5), 362-367. <https://doi.org/10.1007/s00278-007-0548-8>
- Espié, S., Gauriat, P., & Duraz, M. (2005). Driving Simulators Validation: The Issue of Transferability of Results Acquired on Simulator. *Proceedings of the Driving Simulation Conference North America (DSC-NA 2005)*, 149-156.
- Essma, S. (2000). Steering Effort Analysis of an Oval Racing Track Setup Champ Car. *Proceedings of the International ADAMS User's Conference 2000*.
- Faugloire, E., Bonnet, C. T., Riley, M. A., Bardy, B. G., & Stoffregen, T. A. (2007). Motion sickness, body movement, and claustrophobia during passive restraint. *Experimental Brain Research*, 177(4), 520-532. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0700-7>
- Federation of European Motorcyclists' Associations. (2016). *Motorcycle Safety and Accidents in Europe. A summary report*.
- Ferrazzin, D., Barbagli, F., Avizzano, C. A., Di Pietro, G., & Bergamasco, M. (2003). Designing new commercial motorcycles through a highly reconfigurable virtual reality-based simulator. *Advanced Robotics*, 17(4), 293-318. <https://doi.org/10.1163/156855303765203010>
- Ferrazzin, D., Salsedo, F., Barbagli, F., Avizzano, C. A., Pietro, G. D., Brogni, A., Vignoni, M., Bergamasco, M., Arnone, L., Marcacci, M., Masut, L., & Benedetti, A. (2001). *The Moris Motorcycle Simulator: An Overview* (SAE Technical Paper N° 2001-01-1874). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2001-01-1874>
- Ferrazzin, D., Salsedo, F., & Bergamasco, M. (1999). The MORIS simulator. *8th IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction. RO-MAN '99 (Cat. No.99TH8483)*, 136-141. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.1999.900329>
- Francis, B. A., & Wonham, W. M. (1976). The internal model principle of control theory.

- Automatica*, 12(5), 457-465. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(76\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0005-1098(76)90006-6)
- Frank, L. H., Casali, J. G., & Wierwille, W. W. (1988). Effects of Visual Display and Motion System Delays on Operator Performance and Uneasiness in a Driving Simulator. *Human Factors*, 30(2), 201-217. <https://doi.org/10.1177/001872088803000207>
- Fuchs, P., Moreau, G., & Berthoz, A. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle volume 1: L'Homme et l'environnement virtuel* (p. 380). Presse des Mines. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00753715>
- Garrott, W. R. (1994). *Simulator Motion Base Sizing Using Simulation* (SAE Technical Paper N° 940227). SAE International. <https://doi.org/10.4271/940227>
- Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world* (p. xii, 242). Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin.
- Godthelp, H. (1986). Vehicle Control During Curve Driving. *Human Factors*, 28(2), 211-221. <https://doi.org/10.1177/001872088602800209>
- Golding, J. F. (1998). Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness. *Brain Research Bulletin*, 47(5), 507-516. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00091-4)
- Golding, J. F., Bles, W., Bos, J. E., Haynes, T., & Gresty, M. A. (2003). Motion sickness and tilts of the inertial force environment: Active suspension systems vs. active passengers. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 74(3), 220-227.
- Golding, J. F., Markey, H. M., & Stott, J. R. (1995). The effects of motion direction, body axis, and posture on motion sickness induced by low frequency linear oscillation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 66(11), 1046-1051.
- Grácio, B. J. C., Wentink, M., & Valente Pais, A. R. (2011). Driver Behavior Comparison Between Static and Dynamic Simulation for Advanced Driving Maneuvers. *Presence*, 20(2), 143-161. https://doi.org/10.1162/pres_a_00040
- Greznikowski, H., & Schill, V. (2000). With Low Cost to High End- a PC approach at the Daimler-Chrysler Driving Simulator. *Proceedings of the Driving Simulation Conference 2000 (DSC 2000)*.
- Grottoli, M. (2021). *Development and evaluation of a motorcycle riding simulator for low speed maneuvering* [Thèse de doctorat]. Technische Universiteit Delft.
- Grottoli, M., Toso, A., Gubitosa, M., Happee, R., & Holweg, E. (2015). High-Fidelity Multibody Model for a Powered-Two-Wheeler Driving Simulator. *Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2015*.
- Guth, S., Geiger, M., Parduzi, A., Will, S., Pless, R., & Winner, H. (2016). Method to Assess the Processing of Optical Information by Non-primary Riding Tasks while Riding a Motorcycle. *Proceedings of the Bicycle and Motorcycle Dynamics - Symposium on the Dynamics and Control of Single Track Vehicles 2016 (BMD 2016)*.
- Halata, Z., & Baumann, K. I. (2008). Anatomy of receptors. In M. Grunwald (Éd.), *Human*

- Haptic Perception: Basics and Applications* (p. 85-92). Birkhäuser.
https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7612-3_6
- Hale, K. S., & Stanney, K. M. (2004). Deriving haptic design guidelines from human physiological, psychophysical, and neurological foundations. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(2), 33-39.
<https://doi.org/10.1109/MCG.2004.1274059>
- 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 (Éds.), *Advances in Psychology* (Vol. 52, p. 139-183). North-Holland.
[https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hayward, J. C. (1972). Near-miss determination through use of a scale of danger. *Highway Research Record*, 384, 23-34. <https://trid.trb.org/view/115323>
- Hoffmann, S., Krüger, H.-P., & Buld, S. (2003). Avoidance of simulator sickness by training the adaptation to the driving simulation. *VDI Berichte*, 385-404.
- Horswill, M. S., & McKenna, F. P. (1999). The development, validation, and application of a video-based technique for measuring an everyday risk-taking behavior: Drivers' speed choice. *The Journal of Applied Psychology*, 84(6), 977-985.
<https://doi.org/10.1037/0021-9010.84.6.977>
- Kaber, D. B., & Zhang, T. (2011). Human Factors in Virtual Reality System Design for Mobility and Haptic Task Performance. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 7(1), 323-366. <https://doi.org/10.1177/1557234X11410389>
- Käding, W., & Hoffmeyer, F. (1995). *The Advanced Daimler-Benz Driving Simulator* (SAE Technical Paper N° 950175). SAE International. <https://doi.org/10.4271/950175>
- Kageyama, I., & Tagami, N. (2002). Development of a riding simulator for two-wheeled vehicles. *JSAE Review*, 23(3), 347-352. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(02\)00202-3](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(02)00202-3)
- Katayama, T., Nishimi, T., Okayama, T., & Aoki, A. (1996). A simulation model for rider's control behaviors. *JSAE Review*, 4(17), 441.
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9(6), 718-727. [https://doi.org/10.1016/s0959-4388\(99\)00028-8](https://doi.org/10.1016/s0959-4388(99)00028-8)
- Kemeny, A. (2000). Simulation and Perception of Movement. *Proceedings of the Driving Simulation Conference 2000 (DSC 2000)*, 13-22.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.
https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- Kennedy, R. S., & Stanney, K. M. (1996). Postural instability induced by virtual reality

- exposure : Development of a certification protocol. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 8(1), 25-47. <https://doi.org/10.1080/10447319609526139>
- Keshavarz, B., Saryazdi, R., Campos, J. L., & Golding, J. F. (2019). Introducing the VIMSSQ: Measuring susceptibility to visually induced motion sickness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63(1), 2267-2271. <https://doi.org/10.1177/1071181319631216>
- Kohr, R. H. (1961). *Analysis and Simulation of Automobile Ride* (SAE Technical Paper N° 610011). SAE International. <https://doi.org/10.4271/610011>
- Kolasinski, E. M. (1995). *Simulator Sickness in Virtual Environments* (N° 1027). U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Kovacsova, N., Di Gesu, M., Schwab, A. L., Gubitosa, M., Hagenzieker, M. P., & De Winter, J. C. F. (2015). A literature review on human factors research using motorcycle simulators [Poster]. *Proceedings of the Driving Simulation Conference 2015 Europe (DSC 2015)*.
- Krijn, M., Emmelkamp, P. M. G., Olafsson, R. P., & Biemond, R. (2004). Virtual reality exposure therapy of anxiety disorders: A review. *Clinical Psychology Review*, 24(3), 259-281. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2004.04.001>
- Kuiper, O. X., Bos, J. E., Diels, C., & Schmidt, E. A. (2020). Knowing what's coming: Anticipatory audio cues can mitigate motion sickness. *Applied Ergonomics*, 85, 103068. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103068>
- Kuiper, O. X., Bos, J. E., Schmidt, E. A., Diels, C., & Wolter, S. (2020). Knowing What's Coming: Unpredictable Motion Causes More Motion Sickness. *Human Factors*, 62(8), 1339-1348. <https://doi.org/10.1177/0018720819876139>
- Kusumoto, N., Sohmura, T., Yamada, S., Wakabayashi, K., Nakamura, T., & Yatani, H. (2006). Application of virtual reality force feedback haptic device for oral implant surgery. *Clinical Oral Implants Research*, 17(6), 708-713. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2006.01218.x>
- Land, M. F., & Lee, D. N. (1994). Where we look when we steer. *Nature*, 369(6483), Art. 6483. <https://doi.org/10.1038/369742a0>
- Le Chénéchal, M., & Chatel-Goldman, J. (2018). HTC Vive Pro time performance benchmark for scientific research. *Proceedings of the International Conference on Artificial Reality and Telexistence & Eurographics Symposium on Virtual Environments 2018 (ICAT-EGVE 2018)*. <https://doi.org/10.2312/egve.20181318>
- Lécuyer, A. (2009). Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 18(1), 39-53. <https://doi.org/10.1162/pres.18.1.39>
- Lécuyer, A. (2017). Playing with Senses in VR: Alternate Perceptions Combining Vision and Touch. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 37(1), 20-26.

<https://doi.org/10.1109/MCG.2017.14>

- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5(4), 437-459. <https://doi.org/10.1068/p050437>
- Liebherr, M., Mueller, S. M., Schweig, S., Maas, N., Schramm, D., & Brand, M. (2021). Stress and Simulated Environments: Insights From Physiological Marker. *Frontiers in Virtual Reality*, 2. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.618855>
- Liebherr, M., Schweig, S., Brandtner, A., Averbeck, 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>
- Lin, Y., Wang, X., Wu, F., Chen, X., Wang, C., & Shen, G. (2014). Development and validation of a surgical training simulator with haptic feedback for learning bone-sawing skill. *Journal of Biomedical Informatics*, 48, 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2013.12.010>
- Liu, A., & Chang, S. (1995). Force feedback in a stationary driving simulator. *1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*, 2, 1711-1716 vol.2. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1995.538021>
- Lobjois, R., Dagonneau, V., & Isableu, B. (2016). The contribution of visual and proprioceptive information to the perception of leaning in a dynamic motorcycle simulator. *Ergonomics*, 59(11), 1428-1441. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1149229>
- Mars, F. (2008). Driving around bends with manipulated eye-steering coordination. *Journal of Vision*, 8(11), 10. <https://doi.org/10.1167/8.11.10>
- Martensen, H. (2014). *@RISK: Analyse du risque de blessures graves ou mortelles dans la circulation en fonction de l'âge et du mode de déplacement*. Institut Belge pour la Sécurité Routière - Centre de Connaissance Sécurité Routière.
- Martensen, H., & Roynard, M. (2013). *MOTAC - MOTorcycle Accident Causation. Analyse approfondie des accidents graves et mortels impliquant des motocyclistes*. Institut Belge pour la Sécurité Routière - Centre de Connaissance Sécurité Routière.
- Matas, N. A., Nettelbeck, T., & Burns, N. R. (2015). Dropout during a driving simulator study: A survival analysis. *Journal of Safety Research*, 55, 159-169. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2015.08.004>
- McLane, R. C., & Wierwille, W. W. (1975). The Influence of Motion and Audio Cues on Driver Performance in an Automobile Simulator. *Human Factors*, 17(5), 488-501. <https://doi.org/10.1177/001872087501700508>
- McLeod, R. W., & Ross, H. E. (1983). Optic-flow and cognitive factors in time-to-collision estimates. *Perception*, 12(4), 417-423. <https://doi.org/10.1068/p120417>
- McNamee, D., & Wolpert, D. M. (2019). Internal Models in Biological Control. *Annual*

- Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2(1), 339-364.
<https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-105206>
- Meijaard, J. P., Papadopoulos, J. M., Ruina, A., & Schwab, A. I. (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., Nedjari Benhadj Ali, H., Delgehier, F., Bouaziz, S., & Espié, S. (2022). Motorcycle riders vs. Automated vehicles in a congested-traffic situation: A simulator study [Poster]. *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2022 VR (DSC 2022)*.
- Miyamaru, Y., Yamasaki, G., & Aoki, K. (2002). Development of a motorcycle riding simulator. *JSAE Review*, 23(1), 121-126. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(01\)00147-3](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(01)00147-3)
- Mohellebi, H., Kheddar, A., & Espié, S. (2009). Adaptive Haptic Feedback Steering Wheel for Driving Simulators. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(4), 1654-1666. <https://doi.org/10.1109/TVT.2008.2004493>
- Money, K. E. (1970). Motion sickness. *Physiological Reviews*, 50(1), 1-39. <https://doi.org/10.1152/physrev.1970.50.1.1>
- Mühlberger, A., & Pauli, P. (2011). Virtuelle Realität in der Psychotherapie. *PiD - Psychotherapie im Dialog*, 12(2), 143-147. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1276816>
- Nash, C. J., Cole, D. J., & Bigler, R. S. (2016). A review of human sensory dynamics for application to models of driver steering and speed control. *Biological Cybernetics*, 110(2), 91-116. <https://doi.org/10.1007/s00422-016-0682-x>
- Nehaoua, L. (2008). *Conception et réalisation d'une plateforme mécatronique dédiée à la simulation de conduite des véhicules deux-roues motorisés* [Thèse de doctorat]. Université d'Evry-Val d'Essonne.
- Nehaoua, L., Hima, S., Arioui, H., Seguy, N., & Espie, S. (2007). Design and Modeling of a New Motorcycle Riding Simulator. *Proceedings of the IEEE American Control Conference (ACC'07)*, 176-181. <https://doi.org/10.1109/ACC.2007.4283070>
- Nordmark, S., Lidstrom, M., & Palmkvist, G. (1984). *Moving Base Driving Simulator With Wide Angle Visual System* (SAE Technical Paper N° 845100). SAE International. <https://doi.org/10.4271/845100>
- Oman, C. M. (1990). Motion sickness: A synthesis and evaluation of the sensory conflict theory. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 68(2), 294-303. <https://doi.org/10.1139/y90-044>
- Padmos, P., & Milders, M. V. (1992). Quality Criteria for Simulator Images: A Literature Review. *Human Factors*, 34(6), 727-748. <https://doi.org/10.1177/001872089203400606>

- Page, N. G., & Gresty, M. A. (1985). Motorist's vestibular disorientation syndrome. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 48(8), 729-735.
- Pavani, F., Spence, C., & Driver, J. (2000). Visual capture of touch: Out-of-the-body experiences with rubber gloves. *Psychological Science*, 11(5), 353-359. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00270>
- Pierella, C., Casadio, M., Mussa-Ivaldi, F. A., & Solla, S. A. (2019). The dynamics of motor learning through the formation of internal models. *PLoS Computational Biology*, 15(12), e1007118. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007118>
- Pinto, M., Cavallo, V., & Ohlmann, T. (2008). The development of driving simulators: Toward a multisensory solution. *Le travail humain*, 71(1), 62-95. <https://doi.org/10.3917/th.711.0062>
- Previc, F. H. (1992). The effects of dynamic visual stimulation on perception and motor control. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 2(4), 285-295.
- Reason, J. T. (1978). Motion sickness adaptation: A neural mismatch model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11), 819-829.
- Reason, J. T., & Brand, J. J. (1975). *Motion sickness* (p. vii, 310). Academic Press.
- Reed, C., & Ziat, M. (2018). *Haptic Perception: From the Skin to the Brain*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809324-5.03182-5>
- Reymond, G. (2000). *Contribution respective des stimuli visuels, vestibulaires et proprioceptifs dans la perception du mouvement du conducteur* [Thèse de doctorat]. Université Paris VI.
- Reymond, G., & Kemeny, A. (2000). Motion Cueing in the Renault Driving Simulator. *Vehicle System Dynamics*, 34(4), 249-259. <https://doi.org/10.1076/vesd.34.4.249.2059>
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (1999). Contribution of a motion platform to kinesthetic restitution in a driving simulator. *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 1999 (DSC 1999)*, 123-136.
- Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1991). An ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability. *Ecological Psychology*, 3(3), 195-240. https://doi.org/10.1207/s15326969eco0303_2
- Rolnick, A., & Lubow, R. E. (1991). Why is the driver rarely motion sick? The role of controllability in motion sickness. *Ergonomics*, 34(7), 867-879. <https://doi.org/10.1080/00140139108964831>
- Saredakis, D., Szpak, A., Birckhead, B., Keage, H. A. D., Rizzo, A., & Loetscher, T. (2020). Factors Associated With Virtual Reality Sickness in Head-Mounted Displays: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00096>
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2011). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*, 5th

- ed (p. ix, 581). Human Kinetics.
- Schweig, S., Liebherr, M., Schramm, D., Brand, M., & Maas, N. (2018). The Impact of Psychological and Demographic Parameters on Simulator Sickness. *Proceedings of the 8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, 91-97. <https://doi.org/10.5220/0006837300910097>
- Shadmehr, R., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *Journal of Neuroscience*, 14(5), 3208-3224. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.14-05-03208.1994>
- Shahar, A., Dagonneau, V., Caro, S., Israël, I., & Lobjois, R. (2014). Towards identifying the roll motion parameters of a motorcycle simulator. *Applied Ergonomics*, 45(3), 734-740. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.09.013>
- Sharp, R. S. (1971). The Stability and Control of Motorcycles. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 13(5), 316-329. https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1971_013_051_02
- Sharp, R. S., & Alstead, C. J. (1980). The Influence of Structural Flexibilities on the Straight-running Stability of Motorcycles. *Vehicle System Dynamics*, 9(6), 327-357. <https://doi.org/10.1080/00423118008968629>
- Shepard, N. T., & Telian, S. A. (1992). Balance System Function. *American Journal of Audiology*, 1(4), 45-51. <https://doi.org/10.1044/1059-0889.0104.45>
- Siegler, I., Reymond, J., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001). Sensorimotor integration in a driving simulator: Contributions of motion cueing in elementary driving tasks. *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2001 (DSC 2001)*, 21-32.
- Sober, S. J., & Sabes, P. N. (2005). Flexible strategies for sensory integration during motor planning. *Nature Neuroscience*, 8(4), 490-497. <https://doi.org/10.1038/nn1427>
- Stedmon, A. W., Brickell, E., Hancox, M., Noble, J., & Rice, D. (2012). MotorcycleSim: A user-centred approach in developing a simulator for motorcycle ergonomics and rider human factors research. *Advances in Transportation Studies*, 27, 31-48.
- Stedmon, A. W., Hasseldine, B., Rice, D., Young, M., Markham, S., Hancox, M., Brickell, E., & Noble, J. (2011). 'MotorcycleSim': An Evaluation of Rider Interaction with an Innovative Motorcycle Simulator. *The Computer Journal*, 54(7), 1010-1025. <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxp071>
- Stelling, D., Hermes, M., Huelmann, G., Mittelstädt, J., Niedermeier, D., Schudlik, K., & Duda, H. (2021). Individual differences in the temporal progression of motion sickness and anxiety: The role of passengers' trait anxiety and motion sickness history. *Ergonomics*, 64(8), 1062-1071. <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1886334>
- Stoffregen, T. A., & Riccio, G. E. (1991). An Ecological Critique of the Sensory Conflict Theory of Motion Sickness. *Ecological Psychology*, 3(3), 159-194.

https://doi.org/10.1207/s15326969eco0303_1

- Stoffregen, T. A., & Smart, L. J. (1998). Postural instability precedes motion sickness. *Brain Research Bulletin*, 47(5), 437-448. [https://doi.org/10.1016/s0361-9230\(98\)00102-6](https://doi.org/10.1016/s0361-9230(98)00102-6)
- Summala, H. (1988). Risk control is not risk adjustment: The zero-risk theory of driver behaviour and its implications. *Ergonomics*, 31, 491-506. <https://doi.org/10.1080/00140138808966694>
- Todorov, E., & Jordan, M. I. (2002). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*, 5(11), 1226-1235. <https://doi.org/10.1038/nn963>
- Toffin, D., Kemeny, A., Reymond, G., & Droulez, J. (2003). Influence of Steering Wheel Torque Feedback in a Dynamic Driving Simulator. *Proceedings of the Driving Simulation Conference North America 2003 (DSC-NA 2003)*.
- Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., & Droulez, J. (2007). Role of steering wheel feedback on driver performance: Driving simulator and modeling analysis. *Vehicle System Dynamics*, 45(4), 375-388. <https://doi.org/10.1080/00423110601058874>
- van Emmerik, M. L., de Vries, S. C., & Bos, J. E. (2011). Internal and external fields of view affect cybersickness. *Displays*, 32(4), 169-174. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2010.11.003>
- Wada, T. (2021). Computational Model of Motion Sickness Describing the Effects of Learning Exogenous Motion Dynamics. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.634604>
- Warren, D. H., & Strelow, E. R. (1985). *Electronic Spatial Sensing for the Blind: Contributions from Perception, Rehabilitation, and Computer Vision*. Springer Netherlands.
- Watson, G. S. (2000). A synthesis of simulator sickness studies conducted in a high-fidelity driving simulator. *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2000 (DSC 2000)*, 69-78.
- Weir, D. H., & Clark, A. J. (1995). *A Survey of Mid-Level Driving Simulators* (SAE Technical Paper N° 950172). SAE International. <https://doi.org/10.4271/950172>
- Westerhof, B. (2018). *Evaluation of the Cruden Motorcycle Simulator* [Thèse de master]. Technische Universiteit Delft.
- Westerhof, B., Vries, E., Happee, R., & Schwab, A. (2019). Evaluation of a Motorcycle Simulator. *Proceedings of the Bicycle and Motorcycle Dynamics - Symposium on the Dynamics and Control of Single Track Vehicles 2019 (BMD 2019)*.
- Will, S. (2017). *Development of a presence model for driving simulators based on speed perception in a motorcycle riding simulator* [Thèse de doctorat]. Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- Will, S. (2018). A New Approach to Investigate Powered Two Wheelers' Interactions with Passenger Car Drivers: The Motorcycle – Car Multi-Driver Simulation. In K. Bengler,

- J. Drücke, S. Hoffmann, D. Manstetten, & A. Neukum (Éds.), *UR:BAN Human Factors in Traffic: Approaches for Safe, Efficient and Stress-free Urban Traffic* (p. 393-402). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-15418-9_22
- Wilson, M., Stephenson, S., Chattington, M., & Marple-Horvat, D. E. (2007). Eye movements coordinated with steering benefit performance even when vision is denied. *Experimental Brain Research*, 176(3), 397-412. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0623-3>
- Witmer, B. G., Jerome, C. J., & Singer, M. J. (2005). The factor structure of the presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(3), 298-312. <https://doi.org/10.1162/105474605323384654>
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>
- Wolpert, D. M., Diedrichsen, J., & Flanagan, J. R. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(12), 739-751. <https://doi.org/10.1038/nrn3112>
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), 1880-1882. <https://doi.org/10.1126/science.7569931>
- Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, 11(7), 1317-1329. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(98\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(98)00066-5)
- Yamasaki, G., Aoki, K., Miyamaru, Y., & Ohnuma, K. (1998). Development of motorcycle training simulator. *JSAE Review*, 19(1), 81-85. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(97\)00057-X](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(97)00057-X)
- Yamasaki, G., Mitsuru, I., & Miyamaru, Y. (1996). *Riding simulation system for motorcycles* (United States Patent N° US5547382A).
- Yokota, Y., Aoki, M., Mizuta, K., Ito, Y., & Isu, N. (2005). Motion sickness susceptibility associated with visually induced postural instability and cardiac autonomic responses in healthy subjects. *Acta Oto-Laryngologica*, 125(3), 280-285. <https://doi.org/10.1080/00016480510003192>

ANNEXE 1



univ-gustave-eiffel.fr

Informations données en vue du recrutement

L'Université Gustave Eiffel va entreprendre une recherche dont l'objectif est de mesurer le degré de contrôle d'un simulateur de conduite par son conducteur en fonction de l'architecture matérielle et logicielle du simulateur.

Objectif

Le but de cette recherche est d'étudier le comportement de conduite des motards sur simulateur de conduite « moto » suivant l'architecture matérielle et logicielle de ce simulateur. Les données issues de l'expérimentation ainsi que de questionnaires seront collectées et analysées.

Déroulement de la recherche

Nous vous proposons de participer à une séance d'expérimentation d'une durée de 2 h environ. Nous vous demanderons de conduire sur un simulateur moto de façon naturelle, comme vous le faites dans la vie de tous les jours.

À tout moment, vous aurez la possibilité de demander une pause et même d'interrompre définitivement votre participation si vous le souhaitez, sans avoir à vous justifier. Vous en informerez alors le responsable du projet de recherche.

Vous percevrez une indemnité forfaitaire de 75 €, en compensation des contraintes et frais générés par votre participation à cette recherche.

Pourront être incluses dans cette étude les personnes remplissant les critères suivants :

- âgées de 25 à 65 ans ;
- étant titulaires du permis moto depuis 3 ans ou plus ;
- conduisant 3000 km / an ou plus ;
- conduisant une moto ou un scooter de 400 cm³ ou plus ;
- ayant une vision normale ou corrigée à la normale (6 / 10).

Ne pourront pas être incluses les personnes se trouvant dans au moins un des cas suivants :

- femmes enceintes ;
- personnes souffrant de mal des transports ;
- personnes souffrant d'épilepsie photosensible.

Contact

S. Espié, Directeur de recherche, Responsable de l'étude
stephane.espie@univ-eiffel.fr
01 69 15 63 66

ANNEXE 2



univ-gustave-eiffel.fr

Notice d'information à la personne à qui est proposée l'expérimentation

L'Université Gustave Eiffel, en tant que promoteur, vous propose de participer à l'étude suivante :
« Simulateurs de conduite et adéquation architecture / modèles : impact sur la contrôlabilité ».

Les finalités de ce projet de recherche sont :

- la mesure du degré de contrôlabilité d'un simulateur de conduite en fonction de son architecture matérielle et logicielle ;
- l'étude de l'influence de l'architecture matérielle et logicielle d'un simulateur de conduite « moto » sur le comportement de conduite des motards.

L'étude proposée sera réalisée sur simulateur moto. Vous conduirez sur route de rase campagne, d'une part sans rendu d'inclinaison par la plate-forme mobile du simulateur, et d'autre part, avec rendu d'inclinaison. Nous attendons de vous de conduire de façon naturelle, comme vous le faites dans la vie de tous les jours.

Seules les données strictement nécessaires à la réalisation de notre recherche seront collectées et traitées.

Outre la conduite d'un simulateur « moto », vous aurez pendant l'expérimentation à répondre à des questionnaires relatifs à l'évaluation du mal du simulateur, à l'état de présence, à la charge mentale, et l'expérimentatrice ou l'expérimentateur recueillera lors d'un entretien vos commentaires sur votre expérience de conduite sur le simulateur. Cet entretien sera enregistré sous forme audio. Par voie de conséquence, les données vous concernant qui seront recueillies concerneront des informations démographiques, des informations relatives à votre usage de la moto, et à votre conduite lors de l'expérimentation (couples appliqués, positions et vitesses sur le réseau routier), ainsi que des données subjectives qui correspondront à vos réponses aux questionnaires et à l'entretien.

Vous pourrez poser toutes les questions que vous souhaitez et demander autant d'explications que nécessaire, avant, pendant et après l'expérimentation.

De sorte à minimiser les risques de mal du simulateur, des temps de repos vous seront proposés à plusieurs moments de l'expérimentation. Si vous montrez malgré tout des symptômes de mal du simulateur, votre

participation sera interrompue par l'expérimentatrice ou l'expérimentateur, et ce à tout moment de l'expérimentation. Vous pourrez alors vous reposer sur place.

Vous pourrez, si vous le souhaitez, interrompre votre participation à tout moment.

Un retrait n'entraînera aucune conséquence pour vous. Toutefois, les données à caractère personnel collectées préalablement au retrait de votre consentement pourront, si elles le nécessitent, être conservées et traitées dans les conditions prévues de la recherche.

L'Université Gustave Eiffel a souscrit une assurance de responsabilité civile entreprise auprès d'AXA (contrat n°5286028004) couvrant les conséquences dommageables éventuelles que pourrait subir un participant à ce projet de recherche.

Votre participation d'une durée approximative de 2 h, s'inscrit dans une étude qui devrait être mise en place au dernier trimestre 2022.

Vous percevrez une indemnité forfaitaire d'un montant de 75 € en compensation des contraintes et des frais générés par votre participation à la recherche.

Pour des raisons générales de protection des personnes, vous devez être affilié(e) à la sécurité sociale.

Les résultats individuels et les différentes données vous concernant seront strictement confidentiels. Conformément au Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) et à la loi n°78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux informations vous concernant recueillies dans cette étude. Vous disposez également d'un droit à la limitation du traitement de vos données. Pour des motifs légitimes, vous disposez également d'un droit d'opposition à la transmission des données couvertes par le secret professionnel susceptibles d'être utilisées dans le cadre de cette recherche et de faire l'objet d'un traitement informatique.

Vous pourrez exercer ces droits en vous adressant à M. Stéphane Espié (stephane.espie@univ-eiffel.fr ; Bâtiment 660, Rue Noetzelin, 91190 Gif-sur-Yvette ; Tél. : 01 69 15 63 66).

Enfin, conformément au RGPD, vous avez reçu les informations suivantes :

- l'Université Gustave Eiffel, en tant que promoteur de la recherche, est le responsable du traitement (5 Boulevard Descartes, 77420 Champs-sur-Marne ; Tél. : 01 60 95 75 00) ;
- l'Université Gustave Eiffel a nommé une déléguée à la protection des données (DPD) : protectiondesdonnees-dpo@univ-eiffel.fr ;
- le fondement juridique du traitement des données est l'exécution d'une mission d'intérêt public dont est investi le responsable du traitement (article 6.1.e du RGPD) ;
- les données à caractère personnel vous concernant et collectées dans le cadre de l'étude seront conservées en France et ne feront en aucun cas l'objet d'un transfert hors de l'Union européenne ;
- si après avoir contacté les personnes désignées pour veiller au respect des règles relatives à la protection des données, vous estimez que vos droits Informatique et Libertés ne sont pas respectés vous pouvez adresser une réclamation auprès de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) (sur le site internet de la CNIL ou par courrier postal en écrivant à : CNIL, 3 Place de Fontenoy, TSA 80715, 75334 Paris Cedex 07) ;
- enfin les données vous concernant seront conservées trois ans. A l'issue de cette durée, vos données à caractère personnel seront détruites dans leur totalité ou anonymisées et pourront alors être réutilisées, après accord de votre part, à des fins de recherche scientifique.

Fait à, le

Nom et signature de la personne participant à la recherche :

ANNEXE 3



univ-gustave-eiffel.fr

Formulaire de Consentement

Ce formulaire est destiné à recueillir votre consentement manifestant votre accord à la fois concernant la conduite sur simulateur et la collecte des données vous concernant.

Je soussigné(e), résidant

J'ai été invité(e) à participer à une étude réalisée par l'Université Gustave Eiffel dont l'objectif est de mesurer le degré de contrôle d'un simulateur de conduite par son conducteur en fonction de l'architecture matérielle et logicielle du simulateur.

J'ai reçu et compris les informations suivantes :

- ma participation à cette étude consiste à conduire un simulateur de conduite « moto » ;
- je conduirai sur route de rase campagne, d'une part sans rendu d'inclinaison par la plate-forme mobile du simulateur, et d'autre part, avec rendu d'inclinaison ;
- il me sera demandé de conduire de façon naturelle, comme je le fais dans la vie de tous les jours ;
- si, pendant ma participation, je souffre de symptômes du mal du simulateur, les expérimentateurs arrêteront l'expérimentation et me proposeront de me reposer ;
- avant et après avoir conduit, j'effectuerai un test d'équilibre ;
- pendant l'expérimentation, il me sera demandé à plusieurs reprises de répondre à des questionnaires relatifs à l'évaluation du mal du simulateur, à l'état de présence et à la charge mentale ;
- je participerai aussi à un entretien au cours duquel je donnerai mes commentaires sur mon ressenti de conduite sur le simulateur ;
- le but de cette étude est d'examiner l'influence de l'architecture matérielle et logicielle du simulateur de conduite « moto » sur le comportement de conduite des motards.

Les instructions détaillées concernant le déroulement de l'expérimentation me seront données lors de celui-ci par les personnes qui la mettront en œuvre.

La nature de l'étude, son déroulement et ses contraintes m'ont été expliqués par les expérimentateurs. J'ai reçu une réponse satisfaisante à toutes les questions que j'ai pu poser librement à propos de celle-ci.

J'ai été libre d'accepter ou de refuser.

J'accepte de participer à cette étude dans les conditions précisées ci-dessus.

Mon consentement ne décharge pas les organisateurs de l'étude de leurs responsabilités. Si je le souhaite, je suis libre à tout moment d'arrêter ma participation, sans qu'il soit possible de me le reprocher ; j'en informerai alors le responsable de l'étude, son collaborateur ou toute autre personne avec qui je serai amené(e) à être en contact au cours de cette recherche. Toutefois, j'ai été informé(e) que les données à caractère personnel collectées préalablement au retrait de mon consentement pourront, si leur conservation est nécessaire, être stockées et traitées dans les conditions prévues par le projet de recherche.

Les données me concernant resteront strictement confidentielles. Je n'autorise leur consultation et leur traitement informatique que par des personnes qui collaborent à l'étude. J'ai bien noté que le droit d'accès, de rectification, d'opposition, et de limitation, prévu par le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) et la loi n° 78-17 du 6 Janvier 1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés sont applicables à tout moment et peuvent s'exercer auprès de M. Stéphane Espié (stephane.espie@univ-eiffel.fr ; Bâtiment 660, Rue Noetzelin, 91190 Gif-sur-Yvette ; Tél. : 01 69 15 63 66). Je pourrai demander toute information complémentaire à toute autre personne avec qui je serai amené(e) à être en contact au cours de cette recherche.

Enfin, conformément au RGPD, j'ai reçu les informations suivantes :

- l'Université Gustave Eiffel, en tant que promoteur de la recherche, est le responsable du traitement (5 Boulevard Descartes, 77420 Champs-sur-Marne ; Tél. : 01 60 95 75 00) ;
- l'Université Gustave Eiffel a nommé une déléguée à la protection des données (DPD) : protectiondesdonnees-dpo@univ-eiffel.fr ;
- le fondement juridique du traitement des données est l'exécution d'une mission d'intérêt public dont est investi le responsable de traitement (article 6.1.e du RGPD) ;
- les données à caractère personnel me concernant et collectées dans le cadre de l'étude seront conservées en France et ne feront en aucun l'objet d'un transfert hors de l'Union européenne ;
- si après avoir contacté les personnes désignées pour veiller au respect des règles relatives à la protection des données, j'estime que les droits relatifs à mes données personnelles ne sont pas respectés, je peux adresser une réclamation auprès de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) (sur le site internet de la CNIL ou par courrier postal en écrivant à : CNIL, 3 Place de Fontenoy, TSA 80715, 75334 Paris Cedex 07) ;
- qu'enfin les données me concernant seront conservées trois ans. A l'issue de cette durée, mes données à caractère personnel seront détruites dans leur totalité ou anonymisées et pourront alors être réutilisées, après accord de ma part, à des fins de recherche scientifique.

En cas de réutilisation des données pour une recherche scientifique ultérieure :

J'accepte que mes données personnelles collectées via cette étude puissent faire l'objet d'un projet ultérieur permettant d'affiner ou consolider les pistes de recherche issues du présent projet (à l'exclusion de toute exploitation à des fins commerciales), dans les mêmes conditions de confidentialité et de sécurité.

OUI

NON

Je percevrai une indemnité forfaitaire de 75 €, en compensation des contraintes et frais générés par ma participation à cette recherche.

La nature et les contraintes de cette étude m'ont été expliquées par M., Mme, Mlle

Signature de la personne responsable
de la recherche
(précédée de la date manuscrite)

Signature de la personne participant à
la recherche
(précédée de la date manuscrite)