



## **SENSORIMOTO**

### **Approche sensorimotrice de la présence pour la mise au point d'un simulateur de conduite de deux-roues motorisé**

IFSTTAR – LEPSiS

14-20, Boulevard Newton

Cité Descartes, Champs sur Marne

F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

#### *Auteurs*

Régis Lobjois (IFSTTAR–LEPSiS), Franck Mars (IRCCyN), Isabelle Siegler (Université Paris Sud), Stéphane Caro (IFSTTAR–LEPSiS), Florent Colombet (IFSTTAR–LEPSiS), Amit Shahaar (IFSTTAR–LEPSiS), Fabrice Vienne (IFSTTAR–LEPSiS)

#### *Responsable des travaux*

Régis Lobjois (IFSTTAR–LEPSiS)

Tél. : 01 81 66 83 46

Octobre 2013

N° Contrat FSR :	2009/MP/07
Date de notification du contrat :	01/04/2010
Durée du contrat :	30 mois
Nom du responsable FSR :	Jean-François Huère
Nature Confidentielle :	oui ; durée : 9 mois

Les auteurs :

Régis Lobjois<sup>1</sup>, Franck Mars<sup>2</sup>, Isabelle Siegler<sup>3</sup>, Stéphane Caro<sup>1</sup>, Florent Colombet<sup>1</sup>, Amit Shahar<sup>1</sup>, Fabrice Vienne<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)

Laboratoire Exploitation, Perception, Simulations & Simulateurs (LEPSiS)

14-20, Boulevard Newton

Cité Descartes, Champs sur Marne

F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Tel. : 01 40 43 53 46

Email : [regis.lobjois@ifsttar.fr](mailto:regis.lobjois@ifsttar.fr)  
[stephane.caro@ifsttar.fr](mailto:stephane.caro@ifsttar.fr)  
[florent.colombet@gmail.com](mailto:florent.colombet@gmail.com)  
[amit.shahar@ifsttar.fr](mailto:amit.shahar@ifsttar.fr)  
[fabrice.vienne@ifsttar.fr](mailto:fabrice.vienne@ifsttar.fr)

<sup>2</sup> Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN)

Équipe Psychologie, Cognition, Technologie

UMR CNRS 6597

1, rue de la Noë - B.P. 92101

F-44321 Nantes Cedex 03

Tél : 02 40 37 69 19 / Fax : 02 40 37 69 30

Email : [franck.mars@ircyn.ec-nantes.fr](mailto:franck.mars@ircyn.ec-nantes.fr)

<sup>3</sup> UFR STAPS, Université Paris Sud

Laboratoire Complexité, Innovation, Activités Motrices et Sportives

Bât 335

91405 Orsay Cedex

Tél : 01 69 15 43 15 / Fax : 01 69 15 62 22

Email : [isabelle.siegler@u-psud.fr](mailto:isabelle.siegler@u-psud.fr)

## Résumé :

L'opération réalisée proposait de travailler à la mise au point du simulateur de conduite de deux-roues motorisé de l'IFSTTAR et d'évaluer sa validité pour l'étude des comportements des conducteurs moto en s'appuyant sur l'analyse des relations fonctionnelles existant entre les stratégies visuelles et le contrôle de trajectoire. Ce travail a été décliné en trois tâches et quatre études expérimentales. Les trois tâches ont respectivement porté sur la mise au point du modèle de conduite implémenté, sur le développement du tracking des mouvements oculaires dans un contexte de simulation de conduite et enfin sur les effets du roulis visuel (inclinaison de la scène en sens opposé à celle de la moto) sur le positionnement objectif et subjectif des utilisateurs au sein de l'environnement virtuel. Deux des quatre expérimentations réalisées ont adressé les effets du modèle de conduite (conduite en mode braquage sans restitution de mouvement autre que l'inclinaison de la scène visuelle versus conduite en contre-braquage avec restitution de mouvement par la plate-forme) sur les comportements de conduite, les deux autres adressant les effets du roulis visuel sur le contrôle de trajectoire et les stratégies visuelles. Au cours de ces différentes expérimentations, les participants ont réalisé des tâches de conduite à dominante sensorimotrice et complété différents questionnaires (mal du simulateur, sentiment de présence et un questionnaire destiné à recueillir les préférences individuelles). Les résultats ont mis en évidence un effet du modèle de conduite ainsi qu'un effet du roulis visuel sur les mesures objectives et subjectives.

En ce qui concerne le modèle de conduite, si les mesures subjectives ont clairement mis en évidence une préférence pour le modèle contre-braquage, les expériences 2, 3 et 4 ont montré que ce modèle s'accompagne d'une modification dans les stratégies de conduite (déport moins important par rapport au centre de la voie), d'une plus grande variabilité de la trajectoire et d'une plus grande difficulté de contrôle de la direction. Suite à ces résultats complétés par les échanges informels avec les participants, les sources d'amélioration du modèle de conduite en contre-braquage semblent devoir s'orienter vers un travail spécifique sur le retour d'effort guidon (manque de couple dans les virages), sur la sensibilité des capteurs d'effort (meilleure prise en compte du poids du conducteur), vers l'évaluation de différents gains pour le roulis physique (et de son couplage avec le roulis visuel), ou encore vers une comparaison entre une stratégie de commande reposant sur le maintien de l'inclinaison dans le virage et une seconde restituant une inclinaison (tilt) uniquement pendant les phases transitoires.

Si les connaissances parcellaires de la conduite moto entretiennent très certainement la controverse sur les modalités du rendu inertiel et sur l'algorithme de restitution du mouvement, un consensus semble être trouvé sur l'introduction d'un roulis visuel pour assurer l'illusion d'inclinaison. Cependant, l'introduction de ce roulis va inévitablement modifier la dynamique de la scène visuelle. Les résultats obtenus (expériences 3 et 4) ont effectivement montré que plus le roulis visuel augmente, plus les participants ont tendance à couper les virages. Cette position latérale moyenne décalée vers l'intérieur du virage s'accompagne d'une augmentation du nombre de sorties de voie. Sur les directions du regard, les résultats mettent en évidence un relatif maintien de la stratégie point tangent. Cependant, si la manipulation du roulis visuel n'influence pas du tout le positionnement du regard sur l'axe

horizontal, on observe, sur l'axe vertical, une direction moyenne du regard en amont du point tangent, synonyme d'une plus grande anticipation. L'implication de ces résultats pour la simulation de conduite moto est discutée au regard des modèles théoriques du contrôle visuel de la trajectoire.

Mots-clés :

Simulation de conduite moto ; Validité ; Caractéristiques immersives et interactives des dispositifs de simulation ; Modèle de conduite ; Rendu inertiel ; Roulis visuel ; Contre-braquage ; Mesures objectives et subjectives ; Stratégies visuelles ; Mal du simulateur ; Sentiment de présence.

## Table des matières

Table des illustrations .....	9
Liste des principales publications et productions faisant état des travaux .....	12
<b>1. ÉTAT DE LA QUESTION : MOTIVATIONS &amp; CONTEXTE .....</b>	<b>13</b>
1.1. QUELQUES DONNEES CONCERNANT L'ACCIDENTOLOGIE DES DEUX-ROUES MOTORISES .....	13
1.2. LA SIMULATION AU SERVICE DE LA SECURITE ROUTIERE .....	15
1.3. LA VALIDITE DES SIMULATEURS DE CONDUITE, UNE QUESTION CRUCIALE .....	15
1.3.1. <i>La notion d'immersion</i> .....	16
1.3.2. <i>La présence, une mesure de l'acceptation de l'EV par les utilisateurs</i> .....	17
<b>2. LES SIMULATEURS DE CONDUITE MOTO ET LEUR (DOMAINE DE) VALIDITE .....</b>	<b>20</b>
2.1. ARCHITECTURE DES SIMULATEURS DE CONDUITE MOTO .....	21
2.1.1. <i>Le simulateur de l'Université de Tokyo</i> .....	21
2.1.2. <i>Le simulateur de l'Université Nihon</i> .....	23
2.1.3. <i>Le simulateur DIGEM (Université de Padoue)</i> .....	23
2.1.4. <i>Le simulateur Honda Riding Trainer</i> .....	25
2.1.5. <i>Le simulateur MotorcycleSim (Université de Nottingham)</i> .....	25
2.2. ETUDES DE VALIDATION DES SIMULATEURS MOTO .....	28
<b>3. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET .....</b>	<b>31</b>
<b>4. PRESENTATION DU SIMULATEUR DE CONDUITE DEUX-ROUES IFSTTAR .....</b>	<b>32</b>
<b>5. TACHE 1 : MISE AU POINT DU MODELE DE VEHICULE DU SIMULATEUR IFSTTAR.....</b>	<b>35</b>
5.1. ETUDE 1 : EFFETS D'UN MODELE « BASIQUE », « FONCTIONNEL » ET « PHYSIQUE » SUR LES PERFORMANCES DE CONDUITE DANS DES TACHES A FORTES CONTRAINTES SENSORIMOTRICES .....	35
5.1.1. <i>Problématique</i> .....	35
5.1.2. <i>Travail préliminaire sur le pilotage des véris</i> .....	35
5.1.2.1. Situation initiale.....	35
5.1.2.2. Prise en compte de la vitesse consigne .....	36
5.1.2.3. Pilotage en boucle fermée.....	37
5.1.3. <i>Stratégies de commande développées</i> .....	38
5.1.3.1. Architecture générale commune.....	38
5.1.3.2. Stratégie « basique » .....	40
5.1.3.3. Stratégie « fonctionnelle » .....	41
5.1.3.4. Stratégie « physique » .....	43
5.1.4. <i>Protocole expérimental initial</i> .....	44
5.1.4.1. Eligibilité des sujets .....	44
5.1.4.2. Dispositif expérimental.....	44
5.1.4.3. Plan expérimental et tâches .....	44
5.1.4.4. Organisation générale .....	47
5.1.5. <i>Evolutions du protocole expérimental</i> .....	48
5.1.6. <i>Résultats &amp; Discussion</i> .....	49
5.1.6.1. Mal du simulateur .....	49
5.1.6.2. Sentiment de présence.....	52
5.1.6.3. Réalisme/contrôlabilité .....	54
5.1.6.4. Classement des configurations.....	54
5.2. EVOLUTION DE LA STRATEGIE FONCTIONNELLE .....	55
5.2.1. <i>Problématique</i> .....	55
5.2.2. <i>Nouvelle méthode de calcul</i> .....	56

5.3.	ETUDE 2 : EFFETS DU MODELE DE VEHICULE SUR LES PERFORMANCES DE CONDUITE, LE SENTIMENT DE PRESENCE ET LE MAL DU SIMULATEUR.....	57
5.3.1.	<i>Problématique</i> .....	57
5.3.2.	<i>Méthode</i> .....	59
5.3.2.1.	Participants.....	59
5.3.2.2.	Dispositif expérimental.....	59
5.3.2.3.	Tâche et procédure .....	60
5.3.3.	<i>Résultats</i> .....	60
5.3.3.1.	Mal du simulateur .....	60
5.3.3.2.	Questionnaire de présence .....	61
5.3.3.1.	Comparaison directe entre les configurations .....	61
5.3.3.2.	Comportements de conduite .....	62
5.3.4.	<i>Etude 2: Discussion</i> .....	65
5.3.4.1.	Questionnaires .....	65
5.3.4.2.	Comportements de conduite .....	66
5.3.4.3.	Conclusions.....	66
<b>6.</b>	<b>TACHE 2 : DEVELOPPEMENT DU TRACKING DES MOUVEMENTS OCULAIRES DANS UN CONTEXTE DE SIMULATION DE CONDUITE.....</b>	<b>67</b>
<b>7.</b>	<b>TACHE 3 : EFFETS DU ROULIS VISUEL SUR LE CONTROLE DE TRAJECTOIRE ET LES STRATEGIES VISUELLES LORS DE LA PRISE DE VIRAGE. ....</b>	<b>71</b>
7.1.	PROBLEMATIQUE.....	71
7.2.	ETUDE 3 : EFFET DU ROULIS VISUEL SUR LE CONTROLE VISUEL DE LA TRAJECTOIRE ET LES PERFORMANCES DE CONDUITE SUR SIMULATEUR STATIQUE. ....	74
7.2.1.	<i>Méthodes</i> .....	74
7.2.1.1.	Participants.....	74
7.2.1.1.	Dispositif expérimental.....	74
7.2.1.1.1.	Simulateur moto .....	74
7.2.1.1.2.	Oculomètre .....	76
7.2.1.2.	Tâche et plan expérimental.....	76
7.2.1.3.	Procédure .....	76
7.2.1.4.	Analyse des données .....	77
7.2.1.4.1.	Analyse de l'effet du gain visuel sur la dynamique de la scène et du point tangent.....	77
7.2.1.4.2.	Données oculaires .....	78
7.2.1.4.3.	Comportements de conduite .....	78
7.2.2.	<i>Résultats</i> .....	79
7.2.2.1.	Effet du gain visuel sur la dynamique de la scène et du point tangent .....	79
7.2.2.1.1.	Roulis visuel.....	79
7.2.2.1.2.	Position du point tangent par rapport au centre de l'image.....	80
7.2.2.2.	Comportements oculaires .....	80
7.2.2.2.1.	Distance au point tangent des directions de regard .....	80
7.2.2.2.2.	Proportion des directions de regard en fonction de la distance au point tangent .....	81
7.2.2.2.1.	Dispersion des directions de regard (référées au centre de l'image).....	83
7.2.2.3.	Comportements de conduite .....	83
7.2.2.4.	Questionnaire du mal du simulateur.....	84
7.2.2.1.	Questionnaire de présence .....	85
7.2.3.	<i>Discussion</i> .....	86
7.3.	ETUDE 4 : EFFET DU ROULIS VISUEL SUR LE CONTROLE VISUEL DE LA TRAJECTOIRE ET LES PERFORMANCES DE CONDUITE SUR SIMULATEUR MOTO A PLATE-FORME DYNAMIQUE.....	88
7.3.1.	<i>Méthodes</i> .....	89
7.3.1.1.	Participants.....	89
7.3.1.2.	Dispositif expérimental.....	89
7.3.1.3.	Tâche, plan et procédure expérimentale .....	90

7.3.1.4.	Analyse des données .....	90
<b>7.3.2.</b>	<b>Résultats .....</b>	<b>90</b>
7.3.2.1.	Effet du gain visuel sur la dynamique de la scène et du point tangent .....	90
7.3.2.1.1.	Roulis visuel.....	90
7.3.2.1.1.	Position du point tangent par rapport au centre de l'image.....	90
7.3.2.2.	Comportements oculaires .....	92
7.3.2.2.1.	Distance au point tangent des directions de regard .....	92
7.3.2.2.2.	Proportion des directions de regard en fonction de la distance au point tangent .....	92
7.3.2.2.3.	Dispersion des directions de regard (référées au centre de l'image).....	93
7.3.2.1.	Comportements de conduite .....	93
7.3.2.2.	Questionnaire du mal du simulateur .....	95
7.3.2.3.	Questionnaire de présence .....	96
<b>7.3.3.</b>	<b>Discussion.....</b>	<b>97</b>
<b>8.</b>	<b>DISCUSSION GENERALE &amp; CONCLUSION .....</b>	<b>99</b>
	La question du modèle de conduite .....	99
	La question du roulis visuel .....	100
	Une spécificité de la tâche ?.....	101
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>102</b>
<b>10.</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>108</b>
	Annexe 1 : Questionnaire de présence .....	109
	Annexe 2 : Questionnaire sur le réalisme et la contrôlabilité .....	110
	Annexe 3: Résumé et diaporama présentés lors des « Journées Scientifiques 2RM » organisées par l'IFSTTAR les 15 et 16 Octobre 2013 .....	113

## Table des illustrations

TABLEAU 1 : NOMBRE ET POURCENTAGE D'ACCIDENTS CORPORELS ET MORTELS EN DEUX-ROUES MOTORISES SELON LE TYPE D'ACCIDENTS (SEUL OU AVEC UN VEHICULE LEGER). LES DONNEES EN POURCENTAGE ONT ETE CALCULEES A PARTIR DES DONNEES EN NOMBRE FOURNIES DANS LE TABLEAU 30 (P. 42) DU RAPPORT DE LA DISR « GISEMENTS DE SECURITE ROUTIERE : LES DEUX-ROUES MOTORISES » (2008).....	14
TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX SIMULATEURS DE CONDUITE MOTO.....	27
TABLEAU 3 : COTATION DU SSQ (KENNEDY, ET AL., 1993).....	50
TABLEAU 4 – SCORES MOYENS AU SSQ EN FONCTION DE LA SOUS-ECHELLE ET DE LA STRATEGIE DE COMMANDE.....	52
TABLEAU 5 – SCORES AU QUESTIONNAIRE DE PRESENCE EN FONCTION DE LA STRATEGIE DE COMMANDE.....	53
TABLEAU 6 – RESULTATS DES QUESTIONNAIRES DE REALISME/CONTROLABILITE.....	54
TABLEAU 7 – PREFERENCE DES SUJETS EN FIN D'EXPERIMENTATION.....	55
TABLEAU 8 - SCORES AU SSQ (ET) EN FONCTION DE LA SOUS-ECHELLE, DE LA CONFIGURATION DE CONDUITE ET DU MOMENT (AVANT/APRES LA SESSION DE CONDUITE).....	61
TABLEAU 9 - SCORES MOYEN (ET) AU QUESTIONNAIRE DE PRESENCE (SCORE TOTAL ET AUX SOUS-ECHELLES) EN FONCTION DE LA CONFIGURATION DE CONDUITE.....	62
TABLEAU 10: CARACTERISTIQUES DE L'ECHANTILLON DE L'ETUDE 3.....	75
TABLEAU 11 : CARACTERISTIQUES DES VIRAGES DU CIRCUIT UTILISE.....	75
TABLEAU 12 : ROULIS VISUEL MOYEN ET MAXIMUM (ET ECART-TYPE) EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	79
TABLEAU 13 : POSITION MOYENNE (ET ECART-TYPE), MINIMUM ET MAXIMUM DU POINT TANGENT PAR RAPPORT AU CENTRE DE L'IMAGE POUR L'AXE HORIZONTAL ET VERTICAL EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	80
TABLEAU 14 : DISTANCE (MOYENNE ET ECART-TYPE) AU POINT TANGENT DES DIRECTIONS DE REGARD SUR L'AXE HORIZONTAL ET VERTICAL EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	81
TABLEAU 15 : DISPERSION DES DIRECTIONS DE REGARD EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	83
TABLEAU 16 : MOYENNE (ET ECART-TYPE) DE LA VITESSE, DE L'ECART LATERAL AU CENTRE DE VOIE, DE LA VARIABILITE DE CET ECART ET NOMBRE D'INVERSION GUIDON ET DE SORTIES DE VOIE EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	84
TABLEAU 17 : MOYENNE DES SCORES TOTAL ET AUX SOUS-ECHELLES DU SSQ EN FONCTION DU GAIN VISUEL ET DU MOMENT DE PASSATION.....	84
TABLEAU 18 : SCORE TOTAL ET SCORES AUX SOUS-ECHELLES DU QUESTIONNAIRE DE PRESENCE.....	85
TABLEAU 19 : PREFERENCE DES PARTICIPANTS EN FONCTION DU GAIN VISUEL POUR L'ETUDE 3.....	86
TABLEAU 20: CARACTERISTIQUES DE L'ECHANTILLON DE L'ETUDE 4.....	89
TABLEAU 21 : ROULIS VISUEL MOYEN ET MAXIMUM (ET ECART-TYPE), EN DEGRE, EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	91
TABLEAU 22 : POSITION MOYENNE (ET ECART-TYPE), MINIMUM ET MAXIMUM DU POINT TANGENT PAR RAPPORT AU CENTRE DE L'IMAGE POUR L'AXE HORIZONTAL ET VERTICAL EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	91
TABLEAU 23 : DISTANCE (MOYENNE ET ECART-TYPE) AU POINT TANGENT DES DIRECTIONS DE REGARD SUR L'AXE HORIZONTAL ET VERTICAL EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	92
TABLEAU 24 : DISPERSION DES DIRECTIONS DE REGARD EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	93
TABLEAU 25 : MOYENNE DE LA VITESSE, DE L'ECART LATERAL AU CENTRE DE VOIE, DE LA VARIABILITE DE CET ECART ET NOMBRE D'INVERSION GUIDON ET DE SORTIES DE VOIE EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	95
TABLEAU 26 : ROULIS PHYSIQUE MOYEN ET MAXIMUM (ET ECART-TYPE), EN DEGRE, EN FONCTION DU GAIN VISUEL.....	95
TABLEAU 27 : SCORE GLOBAL ET SCORES AUX SOUS-ECHELLES DU SSQ EN FONCTION DU GAIN VISUEL ET DU MOMENT DE PASSATION.....	96
TABLEAU 28 : SCORE TOTAL ET SCORES AUX SOUS-ECHELLES DU QUESTIONNAIRE DE PRESENCE.....	97
TABLEAU 29 : PREFERENCE DES PARTICIPANTS EN FONCTION DU GAIN VISUEL POUR L'ETUDE 4.....	97
FIGURE 1 – SIMULATEUR DEUX-ROUES DE L'UNIVERSITE DE TOKYO. EXTRAIT DE CHIYODA ET AL. [2000].....	22

FIGURE 2 – ARCHITECTURE DU SIMULATEUR DIGEM. ....	24
FIGURE 3 – SIMULATEUR DIGEM. ....	24
FIGURE 4 – SIMULATEUR HONDA RIDING TRAINER. ....	25
FIGURE 5 – ARCHITECTURE DU SIMULATEUR MOTORCYCLESIM. ....	26
FIGURE 6 - REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PARCOURS UTILISE PAR KAGEYAMA & TAGAMI (2002). ....	29
FIGURE 7 – SIMULATEUR MOTO IFSTTAR. ....	33
FIGURE 8 – ARCHITECTURE DU SIMULATEUR IFSTTAR. ....	34
FIGURE 9 - REPRESENTATION DU SYSTEME MECANIQUE PRODUISANT UN DOUBLE RETOUR D’EFFORT SUR LE GUIDON. ....	34
FIGURE 10 - SCHEMA ILLUSTRANT LA SITUATION INITIALE DU PILOTAGE DES VERINS DU SIMULATEUR. ....	36
FIGURE 11 – SCHEMA ILLUSTRANT LA PREMIERE EVOLUTION DU PILOTAGE DES VERINS. ....	37
FIGURE 12 – PILOTAGE DES VERINS A PARTIR DE LA VITESSE ET DE LEUR POSITION COURANTE. ....	37
FIGURE 13 – ARCHITECTURE GENERALE COMMUNE AUX DIFFERENTES STRATEGIES DE COMMANDE DEVELOPPEES. ....	38
FIGURE 14 – RESTITUTION DU ROULIS SUR LE SIMULATEUR 2RM. ....	39
FIGURE 15 – ILLUSTRATION DU RESSORT DE TORSION UTILISE POUR LE RETOUR D’EFFORT AU GUIDON. ....	40
FIGURE 16 – ILLUSTRATION DU CONTROLE EN ROULIS DE LA MOTO DANS LE CAS DE LA STRATEGIE BASIQUE. LE RAYON DE COURBURE DE LA TRAJECTOIRE NE DEPEND QUE DE L’ANGLE DU GUIDON, ET L’ANGLE DE ROULIS EST DETERMINE DE SORTE A CE QUE LA FORCE CENTRIFUGE SOIT COMPENSEE ET QUE LA MOTO SOIT EN « EQUILIBRE ». ....	41
FIGURE 17 – ILLUSTRATION DU CONTROLE EN ROULIS DE LA MOTO DANS LE CAS DE LA STRATEGIE « FONCTIONNELLE ». ....	42
FIGURE 18 – ILLUSTRATION DU CONTROLE EN ROULIS DE LA MOTO DANS LE CAS DE LA STRATEGIE « PHYSIQUE ». ....	43
FIGURE 19 – CONFIGURATION DE LA TACHE DE SLALOM. ....	45
FIGURE 20 – CONFIGURATION DE LA TACHE D’EVITEMENT. ....	46
FIGURE 21 – PLAN DU PARCOURS A SUIVRE POUR LA TACHE DE CONDUITE EN VILLE. ....	46
FIGURE 22 – SCHEMA DE LA ROUTE UTILISEE, COMPOSEE DE TRONÇONS DE LIGNE DROITE DE 100 METRES ET DE COURBES A GAUCHE OU A DROITE DE RAYON DE COURBURE 150 OU 300 METRES. ....	47
FIGURE 23 – DEROULEMENT GENERAL DE L’EXPERIMENTATION. ....	48
FIGURE 24 – PROTOCOLE FINAL DE L’EXPERIMENTATION. ....	49
FIGURE 25 – SCORES AU SSQ PAR SUJET POUR LA SOUS-ECHELLE « NAUSEE ». ....	51
FIGURE 26 - SCORES AU SSQ PAR SUJET POUR LA SOUS-ECHELLE « OCULOMOTEUR ». ....	51
FIGURE 27 - SCORES AU SSQ PAR SUJET POUR LA SOUS-ECHELLE « DESORIENTATION ». ....	51
FIGURE 28 - SCORE TOTAL AU SSQ PAR SUJET EN FONCTION DE LA STRATEGIE DE COMMANDE. ....	52
FIGURE 29 - REPRESENTATION DE LA METHODE DE CALCUL. ELLE EST COMPOSEE DE QUATRE SOUS-ENSEMBLES REPRESENTES PAR DES CADRES VERTS. TROIS DE CES SOUS-ENSEMBLES PERMETTENT RESPECTIVEMENT LE CALCUL DU ROULIS, DU LACET, ET DU RETOUR D’EFFORT GUIDON. LE DERNIER PERMET DE REPARTIR LEUR RENDU ENTRE LES MOUVEMENTS DE LA PLATEFORME ET L’AFFICHAGE VISUEL. PARMIS LES BLOCS ELEMENTAIRES, LES BLOCS RECTANGULAIRES REPRESENTENT DES FONCTIONS QUI DEPENDENT DE LA VITESSE A LAQUELLE ROULE LA MOTO. ....	58
FIGURE 30 – SCORES MOYENS AU QUESTIONNAIRE DE COMPARAISON ENTRE LES TROIS CONFIGURATIONS DE CONDUITE. ....	62
FIGURE 31 - POSITION LATERALE EN LIGNE DROITE AVANT L’ENTREE DANS UN VIRAGE A DROITE. LE ZERO REPRESENT LE CENTRE DE LA VOIE. LES VALEURS NEGATIVES CORRESPONDENT A LA DISTANCE EN METRE A DROITE DU CENTRE DE VOIE. ....	63
FIGURE 32 - POSITION LATERALE EN LIGNE DROITE AVANT L’ENTREE DANS UN VIRAGE A GAUCHE. LES VALEURS POSITIVES CORRESPONDENT A LA DISTANCE EN METRE A GAUCHE DU CENTRE DE VOIE. ....	64
FIGURE 33 – POSITION LATERALE MOYENNE POUR LES VIRAGES A GAUCHE EN FONCTION DE LA CONFIGURATION DE CONDUITE. LES VALEURS POSITIVES (EN METRE) INDIQUENT UN POSITIONNEMENT A GAUCHE DU CENTRE DE LA VOIE. ....	64
FIGURE 34 – POSITION LATERALE POUR LES VIRAGES A DROITE EN FONCTION DE LA CONFIGURATION DE CONDUITE. ....	65
FIGURE 35 : OCULOMETRE PERTECH. ....	67
FIGURE 36 : ILLUSTRATION DU SUIVI AUTOMATIQUE DES ZONES D’INTERET PROCHES. ....	69
FIGURE 37 : ILLUSTRATION DU SUIVI AUTOMATIQUE DES ZONES D’INTERET INTERMEDIAIRES. ....	69
FIGURE 38 : ILLUSTRATION DU SUIVI AUTOMATIQUE DES ZONES D’INTERETS ELOIGNEES. ....	70
FIGURE 39 : ILLUSTRATION DU SUIVI AUTOMATIQUE DE LA ZONE DITE POINT TANGENT. ....	70
FIGURE 40 : ILLUSTRATION DU SUIVI DYNAMIQUE DE L’ENSEMBLE DES REGIONS D’INTERET. ....	71

FIGURE 41 : ILLUSTRATION DE L'INCLINAISON DE LA SCENE VISUELLE EN SENS OPPOSE A LA DIRECTION DU VIRAGE POUR RESTITUER LA SENSATION D'INCLINAISON EN CONDUITE MOTO SUR SIMULATEUR.....	72
FIGURE 42 : ILLUSTRATION DU POINT TANGENT. CE POINT CORRESPOND A L'INTERSECTION ENTRE LE BORD INTERIEUR DU VIRAGE ET LA TANGENTE, AU POINT D'OBSERVATION, A LA COURBURE INTERIEURE DE CE MEME VIRAGE (SCHEMA DE GAUCHE). DU POINT DE VUE VISUEL, IL CORRESPOND AU POINT D'INVERSION DES LIGNES DE FLUX CONTENUES DANS LE FLUX OPTIQUE.....	73
FIGURE 43 : ILLUSTRATION DE L'INCIDENCE, SUR LE POINT TANGENT, D'UNE INCLINAISON DE 26 DEGRES EN ROULIS. LE RECTANGLE ROUGE MATERIALISE UNE ZONE DE 3x4° DE COTE AUTOUR DU POINT TANGENT. DANS L'IMAGE DE DROITE, LE POINT TANGENT SUBIT UN DEPLACEMENT DE +0,15° SUR L'AXE HORIZONTAL ET DE +4,2° SUR L'AXE VERTICAL, COMPARATIVEMENT A L'IMAGE DE GAUCHE, POUR UN VEHICULE POSITIONNE 20 CM A L'INTERIEUR DU VIRAGE PAR RAPPORT AU CENTRE DE SA VOIE. ....	74
FIGURE 44 : PROCEDURE EXPERIMENTALE SUIVIE. ....	77
FIGURE 45 : PROPORTION, SUR L'AXE HORIZONTAL, DE DIRECTIONS DE REGARD EN FONCTION DU GAIN VISUEL ET DE LA DISTANCE (EN DEGRE) AU POINT TANGENT. ....	82
FIGURE 46 : PROPORTION, SUR L'AXE VERTICAL, DE DIRECTIONS DE REGARD EN FONCTION DU GAIN VISUEL ET DE LA DISTANCE (EN DEGRE) AU POINT TANGENT. ....	82
FIGURE 47 : MOYENNE DES SCORES OBTENUS AUX SOUS-EHELLES ET AU TOTAL DU SSQ (DIFFERENCES DE SCORE ENTRE SCORES POST ET PRE-SESSION).....	85
FIGURE 48 : PROPORTION DE DIRECTIONS DE REGARD SUR L'AXE HORIZONTAL EN FONCTION DU GAIN VISUEL ET DE LA DISTANCE (EN DEGRE) AU POINT TANGENT. ....	94
FIGURE 49 : PROPORTION DE DIRECTIONS DE REGARD SUR L'AXE VERTICAL EN FONCTION DU GAIN VISUEL ET DE LA DISTANCE (EN DEGRE) AU POINT TANGENT. ....	94
FIGURE 50 : MOYENNE DES SCORES OBTENUS AUX SOUS-EHELLES ET AU TOTAL DU SSQ (DIFFERENCES ENTRE SCORES POST ET PRE-SESSION).....	96

*Liste des principales publications et productions faisant état des travaux*

Articles en préparation :

Colombet, F., Lobjois, R., Espié, S., Caro, S. Riding a motorcycle simulator : Comparison of three control strategies.

Shahar, A., & Lobjois, R. Assessing the influences of a motion base and of the steering model on riding performance on a motorcycle simulator.

Lobjois R., Mars, F., & Siegler, I. Effects of visual roll tilt on visual control of steering and riding performance on a fixed-base motorcycle simulator.\*

Lobjois R., Mars, F., & Siegler, I. Effects of visual roll tilt on visual control of steering and riding performance on a moving-base motorcycle simulator.\*

\* Ces deux articles sont susceptibles d'être fusionnés en une seule et même soumission en revue.

Communications orales

Lobjois, R., Mars, F., & Siegler, I. (2013). Simulation de conduite moto : Effets du roulis visuel sur le contrôle de trajectoire et les stratégies visuelles lors de la prise de virage. Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », IFSTTAR, 15-16 Octobre, Lyon-Bron.

Brevet en cours de dépôt (ce brevet se rapporte aux besoins en développement apportés à la plate-forme dynamique du simulateur moto et non aux résultats obtenus au titre du contrat proprement dit)

Caro, S., Espié, S., Lobjois, R., Benedetto, S., Vienne, F. Méthode de calcul des composantes latérales (roulis et lacet) et du retour d'effort guidon pour simulateur de conduite moto.

# SENSORIMOTO

## Approche sensorimotrice de la présence pour la mise au point d'un simulateur de conduite de deux-roues motorisé

Le projet Sensorimoto portait sur la mise au point d'un simulateur de conduite de deux-roues motorisé à plate-forme dynamique et sur sa validité pour l'étude des comportements des conducteurs moto. La problématique centrale traitait des modalités de la restitution des informations sensorielles et de leur impact sur la capacité des conducteurs à contrôler le simulateur. Dans cette perspective, le travail s'est centré sur les comportements lors de la prise de virage, situation à forte contrainte sensorimotrice, en étudiant les interactions entre les modalités de restitution des informations sensorielles, la prise d'informations visuelles et le contrôle de la trajectoire.

### 1. État de la question : Motivations & Contexte

#### 1.1. Quelques données concernant l'accidentologie des deux-roues motorisés

En tant que piéton, les enfants et les personnes âgées constituent deux populations particulièrement à risque. En ce qui concerne les véhicules motorisés, ce sont les conducteurs de deux roues qui se trouvent confrontés à un sur-risque important comparativement aux autres usagers de la route. En effet, le risque d'avoir un accident pour un conducteur de deux-roues est très supérieur à celui d'un conducteur de voiture, jusqu'à 20 fois plus si l'on tient compte du kilométrage parcouru (ONISR, 2007). Selon l'International Road Traffic and Accident Database (cité dans DISR, 2008), la France se situe à une très mauvaise avant-dernière place de l'accidentalité moto, avec un risque de 3,4 à 4 fois supérieur à celui d'autres pays européens. Pour la fin 2005, les données collectées permettaient de dresser un bilan alarmant : les utilisateurs de deux-roues motorisés représentaient 23,3 % des tués (avec, respectivement, 6,7 % de cyclomotoristes<sup>1</sup> et 16,6 % de motards<sup>2</sup>) alors qu'ils correspondent à environ 1 % du trafic routier (DISR, 2008). Et cette statistique continue à croître sur les 8 premiers mois de 2007 (en donnée brute).

Vu leur représentativité dans le trafic routier, les deux-roues motorisés ont souvent été considérés comme une population marginale. Cette catégorie d'usagers tend cependant, ces dernières années, à se développer de manière significative, notamment en agglomération pour contourner les problèmes de congestion de trafic. A noter donc que le nombre annuel

---

<sup>1</sup> Conducteurs de deux-roues motorisés dont la cylindrée ne dépasse pas 50 cm<sup>3</sup> et la vitesse maximale par construction 45 km/h.

<sup>2</sup> Conducteurs de deux-roues type scooter dont la cylindrée n'excède pas 125 cm<sup>3</sup> et conducteurs de motos dont la cylindrée dépasse 125 cm<sup>3</sup>.

d'immatriculation de deux-roues motorisés neufs a augmenté de plus de 50 % sur la période 1996-2005, pour atteindre un parc total de plus de 2,5 millions de véhicules immatriculés (DISR, 2008).

Parmi les raisons et facteurs de risque identifiés apparaissent une vulnérabilité extrême venant du manque de protection, un parc en constante augmentation, le dépassement des vitesses autorisées, l'alcool mais également le rôle des infrastructures routières et les interactions avec d'autres usagers de la route (défaut d'anticipation de la part du deux-roues et/ou défaut de détection de la part de l'automobiliste). De la nature des accidents impliquant un deux-roues motorisé, nous retiendrons des données présentées dans le rapport de la DISR « *Gisements de sécurité routière : les deux-roues motorisés* » (2008), que si la majorité des accidents implique un véhicule léger, les conducteurs de deux-roues se blessant ou se tuant seuls sont loin d'être marginaux (Tableau 1).

**Tableau 1 : Nombre et pourcentage d'accidents corporels et mortels en deux-roues motorisés selon le type d'accidents (seul ou avec un véhicule léger). Les données en pourcentage ont été calculées à partir des données en nombre fournies dans le Tableau 30 (p. 42) du rapport de la DISR « Gisements de sécurité routière : les deux-roues motorisés » (2008).**

Type d'accidents	Accidents corporels		Accidents mortels	
	Nombre	%	Nombre	%
Seul	3196	17,47	287	<b>32,57</b>
Avec un véhicule léger	11242	61,44	361	40,98
Total	18293	-	881	-

Ces quelques données d'accidentologie des deux-roues à moteur montrent que leurs utilisateurs représentent clairement un enjeu de sécurité routière et soulignent la nécessité d'approfondir nos connaissances quant aux règles comportementales adoptées par les conducteurs de deux-roues ou par les autres usagers de la route vis-à-vis des deux-roues. Cela semble d'autant plus critique que la littérature abordant la question des deux-roues s'est essentiellement développée sur le thème de l'accidentologie ou encore du port du casque et des techniques favorisant l'augmentation de ce comportement sécuritaire (e.g., Lajunen & Rasanen, 2004), et que rares sont les études qui se sont intéressées aux comportements de conduite des pilotes de deux-roues. D'autre part, les recherches dites comportementales (e.g., Rutter & Quine, 1996) ont surtout pointé les croyances et la perception du risque par le motard, ainsi que ses prédispositions à enfreindre les règles de sécurité routière (entre autres, le respect des limitations de vitesse).

Afin de lutter contre cette sinistralité des deux-roues motorisés et d'améliorer leur sécurité, de nombreux moyens sont aujourd'hui utilisés, avec, entre autres exemples, le développement de dispositifs de sécurité primaire, secondaire ou tertiaire, ou de campagne de sensibilisation. La simulation se positionne également comme un moyen à ne pas négliger pour mieux cerner l'origine de cette sinistralité et les avantages liés aux études sur simulateurs sont nombreux (absence de risque, reproductibilité des situations, strict contrôle des paramètres expérimentaux, gain de temps, diminution des coûts d'expérimentation). La simulation

constitue, de plus, une voie importante à emprunter si l'on considère le fort potentiel de développement de la réalité virtuelle, de l'informatique et des technologies de l'information.

## **1.2. La simulation au service de la sécurité routière**

Dans le domaine de la sécurité routière, force est de constater que la simulation est un outil très largement employé que ce soit pour l'évaluation des performances de conduite et l'étude des comportements des conducteurs (essentiellement automobiles ; e.g., Fajen, 2005, sur la question du freinage, ou Mars, 2008, sur celle du contrôle de trajectoire lors de la prise de virage) ou des piétons (e.g., Lobjois & Cavallo, 2007 ; 2009), pour les modèles de trafic et des comportements produits par les agents autonomes permettant ainsi de « baigner » les conducteurs « sujets » dans des environnements réalistes (e.g., Bonte et al., à paraître), pour la conception des infrastructures routières, ou encore pour la formation initiale comme continue ou pour le retour à la conduite (e.g., Allen et al., 2007).

Ce dernier intérêt porté à la simulation rejoint, dans le récapitulatif des propositions qui ont été émises dans le rapport de la DISR concernant les enjeux et actions sur différentes cibles spécifiques aux deux-roues motorisés, celle de l'évaluation de l'apport des simulateurs de conduite de deux-roues dans la formation.

Cependant, il reste une question cruciale à aborder avant de pouvoir exploiter pleinement le potentiel de recherche et de formation des simulateurs de conduite : la simulation est-elle, dans cette perspective, un outil fiable ?

La simulation vise, en effet, la création d'une illusion de la réalité qui soit acceptée par les utilisateurs. Cette illusion est fondée sur la stimulation de plusieurs de nos sens (visuel, auditif, kinesthésique et haptique pour les plus courants en simulation de conduite). Il s'agit alors de déterminer quelles sont les caractéristiques de cette stimulation multi-sensorielle qui permettent aux utilisateurs d'adopter des comportements naturels en simulation. S'attaquer à cette question fondamentale implique de conduire des recherches capables de définir et circonscrire le domaine de validité d'un simulateur de conduite, qui devient alors objet des recherches.

Le projet s'inscrit dans le cadre de cette problématique de la validité des outils de réalité virtuelle en général et de celle d'un simulateur de conduite de deux-roues motorisé en particulier. Il vise donc la mise au point d'un outil dont l'issue permettra d'adresser les comportements des deux-roues et se positionne comme un projet amont des usages les plus couramment faits de la simulation.

## **1.3. La validité des simulateurs de conduite, une question cruciale**

L'utilisation des Environnements Virtuels (EV) pour l'étude des comportements humains pose le problème des effets de tels dispositifs sur la capacité des opérateurs humains à adopter des comportements naturels. Pour Fuchs et Moreau (2003), il y a ici nécessité de concevoir des systèmes « visant à exploiter un comportement humain naturel et sans acquis préalable »

et donc de contribuer à la conception d'EV mieux adapté aux tâches, besoins et caractéristiques des utilisateurs. A la démarche de conception de tels outils expérimentaux s'adjoint alors celle de leur évaluation et de leur domaine de validité. Sur cette délicate question, le niveau de fidélité d'un EV dépendant non seulement de ses caractéristiques intrinsèques mais aussi de celles des utilisateurs (Burkhardt et al., 2003), plusieurs auteurs proposent de distinguer les notions d'immersion et de présence afin de pouvoir déterminer dans l'interaction en jeu, ce qui relève de la technologie – l'immersion – et ce qui relève de l'utilisateur lui-même – son sentiment de présence – (e.g., Mestre & Fuchs, 2006 ; Schuemie et al., 2001 ; Slater & Wilbur, 1997).

### 1.3.1. La notion d'immersion

L'immersion se définit comme l'exposition d'un utilisateur à un EV en occultant tout ou partie du monde réel pour afficher en lieu et place un monde artificiel. L'immersion étant liée par essence à la nature multimodale de la perception, elle est donc obtenue en substituant les sensations produites par le monde réel par leurs correspondances dans le monde virtuel (e.g., Mestre & Fuchs, 2006). A cette notion d'immersion s'adosse celle d'interactivité par laquelle le sujet peut manipuler les objets présents dans son environnement direct ou encore s'y déplacer, et qui, par différents systèmes de capteurs permet de mettre à jour en temps réel l'information fournie au sujet.

Le caractère immersif et interactif d'un EV relève ainsi de ses aspects technologiques et donc des propriétés des dispositifs logiciels et matériels utilisés (Burkhardt et al., 2003). Par ces objectifs du degré et de la qualité avec lesquels le système contrôle l'interface entre l'utilisateur et le monde virtuel, Burkhardt et al. (2003) ont proposé que la qualité de l'immersion relève :

- 1) des modalités sensorielles mises en œuvre dans l'interaction (i.e., la richesse sensorielle ; Mestre & Fuchs, 2006),
- 2) des propriétés des dispositifs d'interaction pour chacune des modalités retenues,
- 3) de la cohérence interne et la latence globale de l'information et des réactions délivrées en temps réel par le système,
- 4) des propriétés de l'environnement physique dans lequel se déroule l'expérience.

Ces notions d'immersion et d'interactivité renvoient à celles de fidélité du stimulus proposée par Stoffregen et al. (2003).

La question de la restitution des informations sensorielles impliquées dans l'interaction (voir par exemple, Morice et al., 2008, sur la question des délais) et des modalités de cette restitution est une question cruciale pour la validité d'un EV. Si la caractérisation des aspects visuels et sonores de la restitution est aujourd'hui la plus avancée, la restitution des informations issues de mécanismes ayant des contraintes inertielles est plus délicate. C'est le cas par essence des simulateurs de conduite ou de vol à plate-forme mobile. En effet, une restitution inadéquate du mouvement est susceptible d'être à l'origine de distorsions sensorielles et de provoquer des différences dans le comportement. Lors de la conduite en situation réelle, le conducteur reçoit des informations sensorielles nombreuses, variées et

parfois redondantes. En effet, outre les informations visuelles et auditives, il perçoit les accélérations et les vibrations du véhicule grâce aux systèmes vestibulaire et proprioceptif, ainsi que le comportement du véhicule sur la route grâce aux sensations haptiques au niveau du volant. Ces informations sensorielles sont essentielles pour le contrôle du véhicule et donnent au conducteur la perception du mouvement du véhicule dans l'espace. Il est à noter que les informations vestibulaires sont traitées pas le système nerveux central (SNC) beaucoup plus rapidement que les informations visuelles (de l'ordre de 20ms pour les unes, et 200 ms pour les autres). Elles sont donc cruciales pour le contrôle de la trajectoire du véhicule mais constituent aussi une des raisons pour lesquelles la restitution du mouvement dans un simulateur de conduite par une plate-forme mobile est délicate à concevoir et à optimiser. En effet, dans un simulateur de conduite, une partie seulement des stimulations sensorielles liées au mouvement du véhicule peut être simulée. Il est notamment impossible de restituer l'amplitude élevée des accélérations linéaires subies par le véhicule lors notamment de la prise de virage (Reymond et al., 2001) et lors du freinage. Des accélérations angulaires peuvent dans une certaine mesure se substituer à des accélérations linéaires (Groen & Bles, 2004). Dans la mise au point d'un simulateur de conduite, une des questions fondamentales est donc de connaître ce que doivent/peuvent être les stratégies de commande de la plate-forme mobile pour procurer au conducteur du simulateur le sens de son mouvement dans l'espace (ou celui de son véhicule), sans bien sûr générer des conflits visuo-vestibulaires qui auraient comme conséquences de perturber le contrôle du véhicule dans la situation de simulation (Reymond et al., 2002, Dagdelen et al., 2004). Une question parallèle est de savoir comment restituer par retour d'effort les sensations haptiques au volant pour que, de même, celles-ci permettent un contrôle fidèle du véhicule simulé (Toffin et al., 2007). Depuis que l'intégration de plates-formes mobiles dans les simulateurs de conduite s'est multipliée, cette question de l'intégration multi-sensorielle est donc devenue primordiale (Reymond & Kemeny, 2000, Siegler et al., 2000). Cependant, le nombre de travaux scientifiques validant les choix technologiques par des protocoles de psychologie expérimentale ou de neurosciences intégratives et comportementales reste très limité (Kemeny & Panerai 2003, pour une revue).

### 1.3.2. La présence, une mesure de l'acceptation de l'EV par les utilisateurs

Si l'immersion est probablement le concept le mieux délimité, la présence fait l'objet de différentes définitions et théories sous-jacentes (e.g., Schuemie et al., 2001, pour une revue). Il faut pourtant bien insister sur le fait que le concept de présence semble constituer la pierre angulaire de toute démarche de validation d'un EV puisqu'elle consacre les liens entre le dispositif et l'utilisateur lui-même. La présence correspond en effet à la sensation que l'on cherche à donner au sujet que l'objet ou l'environnement qu'il observe est réellement présent, autrement dit que le sujet est « à l'intérieur » du monde virtuel. La présence représente ainsi la conséquence psychologique, perceptive et cognitive de l'immersion (Burkhardt et al., 2003 ; Mestre & Fuchs, 2006 ; Stoffregen et al., 2003) et concerne le positionnement cognitif, perceptif et moteur du sujet entre le monde réel et le monde virtuel. La présence est donc un

paramètre multidimensionnel de l'interaction entre le sujet et l'EV (Mestre & Fuchs, 2006 ; Schuemie et al., 2001 ; Witmer & Singer, 1998).

Schuemie et al. (2001) font remarquer que l'orientation de l'attention du sujet est un facteur de la présence souvent pointé. Witmer et Singer (1998) avancent à ce propos que la focalisation de l'attention du sujet sur un ensemble cohérent de stimuli, activités ou événements (qui font sens dans le cadre de la tâche/objectif à réaliser) entraîne une plus forte implication du sujet et favorise un plus grand sentiment de présence.

Ils ont ainsi proposé que la présence dépende :

- 1) du niveau de contrôle que l'utilisateur a sur les événements,
- 2) du nombre et de la qualité des stimulations sensorielles,
- 3) du degré d'implication dans la tâche et de distraction vis-à-vis de l'EV (e.g., impression d'isolement, motivation du sujet, et on retiendra tout particulièrement ici la transparence de l'interface ; Held & Durlach, 1992), distraction que l'on peut mesurer par l'attention, la mémoire ou la cognition spatiale (IJsselsteijn, 2004),
- 4) du degré de réalisme (degré de ressemblance entre le simulacre engendré par l'EV et les aspects du monde réel qui sont concernés).

Witmer et al. (2005) ont ainsi montré que le facteur implication/distraction constituait le facteur dominant du sentiment de présence. Ils ont également mis en évidence des relations significatives entre :

- 1) le niveau de distraction vis-à-vis de l'EV et la fidélité sensorielle, suggérant que la qualité des stimulations sensorielles influence directement la capacité de l'opérateur à focaliser son attention sur la tâche,
- 2) le niveau de distraction vis-à-vis de l'EV et le degré de contrôle que l'opérateur a sur les événements, plus le degré de contrôle augmentant plus l'opérateur pouvant se focaliser sur la tâche à réaliser,
- 3) et entre le degré de contrôle et la fidélité sensorielle.

Du fait de ces multiples sources et facteurs d'influence, mais aussi des différents usages auxquels peuvent être dédiés les EV (apprentissage, formation, réhabilitation, thérapie), une variété de mesures de la présence est disponible. Ces mesures sont classiquement organisées entre des mesures subjectives de la présence, effectuées par questionnaire, et des mesures objectives, elles-mêmes subdivisées entre des mesures physiologiques et des mesures comportementales (e.g., Mestre & Fuchs, 2006 ; Schuemie et al., 2001 ; van Baren & IJsselsteijn, 2004). Malgré les sources de confusion avec le réalisme (et avec la « fidélité subjective de l'expérience », Stoffregen et al., 2003) et les limites intrinsèques aux questionnaires (introspection, administration après l'expérience), les mesures subjectives du sentiment de présence présentent l'intérêt de disposer de l'évaluation par le sujet de son positionnement vis-à-vis de l'EV. En ce qui concerne les mesures objectives et tout particulièrement les mesures comportementales, nombre d'auteurs considèrent que la présence peut également tenir au fait que les comportements produits dans l'EV correspondent à ceux naturellement adoptés en situation réelle, ou encore que les processus

mis en jeu lors de la situation simulée et réelle soient identiques (i.e., fidélité psychologique, Burkhardt et al., 2003 ; « functional fidelity », Moroney & Moroney, 1998 ; « action fidelity », Riccio, 1995 ; « response similarity », van Baren & IJsselsteijn, 2004). Mestre et Fuchs (2006) se sont ainsi récemment positionnés pour une approche sensori-motrice du phénomène de présence, argumentant que « beaucoup de progrès peuvent être fait dans la caractérisation de l'efficacité des environnements virtuels (...) en adoptant une analyse du comportement du sujet au niveau des modèles de couplage sensori-moteur ».

Si l'analyse du comportement oculomoteur du sujet n'est pas nouvelle en particulier pour déterminer le niveau d'attention et de distraction vis-à-vis de l'EV (e.g., Laarni, Ravaja & Saari, 2003), ce type de mesure présente un intérêt non négligeable pour l'étude des couplages sensorimoteurs. En effet, dans bien des tâches, diriger le regard vers un point donné de l'environnement ne consiste pas ou pas seulement à acquérir de l'information symbolique disponible à cet endroit, mais sert à guider le système moteur en charge d'exécuter un geste ou un déplacement (Land & Furneaux, 1997). C'est le cas notamment de la conduite automobile où direction du regard et contrôle de la trajectoire sont intimement liés. En particulier, les conducteurs regardent fréquemment en virage un point particulier du bord intérieur de la route, le point tangent (Land & Lee, 1994 ; Mars, 2006, 2008). Regarder vers le point tangent pourrait fournir une lecture immédiate de la courbure de la route qui peut être utilisée directement comme entrée pour le système moteur qui contrôle la direction du véhicule. Malgré l'accent porté par les formateurs sur les stratégies visuelles à adopter (Motorcycle Safety Foundation, 2004), très peu de travaux expérimentaux ont porté sur les stratégies de prise d'information visuelle chez les conducteurs de deux-roues et sur les relations fonctionnelles qu'elles entretiennent avec le contrôle de la trajectoire. Un des enjeux du projet sera donc de construire une base de connaissances sur cette question grâce à l'utilisation d'un outil de mesure adapté.

Dans le cadre de la mise au point d'un simulateur de conduite moto à plate-forme mobile pour l'étude des comportements des conducteurs, l'étude des liens entre les caractéristiques immersives et interactives du dispositif et la sensation de présence constitue un outil important pour encadrer la démarche de qualification et d'évaluation d'un tel simulateur. Alors que les limites intrinsèques de toute plate-forme mobile entachent la fidélité du stimulus (impossibilité de restituer à l'identique les mouvements ressentis en situation réelle), certains auteurs considèrent qu'il s'agit là d'un élément rédhibitoire pour la sensation de présence et son évaluation subjective par le sujet (e.g., Prothero et al., 1995) du fait des liens entre la fidélité du stimulus et certains facteurs de la présence (en particulier, les facteurs sensoriels et les facteurs de contrôle). D'autres auteurs considèrent au contraire que la fidélité de l'expérience ressentie par le sujet tout comme la fidélité du stimulus ne sont pas suffisantes pour garantir un comportement naturel (Morice et al., 2008 ; Stoffregen et al., 2003). L'étude du comportement du sujet du point de vue de l'identification de couplages sensori-moteurs naturels est une voie à emprunter pour concevoir et évaluer les dispositifs de réalité virtuelle.

En complément, il faut remarquer que l'étude de la présence a donné lieu à l'utilisation intensive du questionnaire comme méthode d'évaluation du phénomène. Il est pourtant suggéré que la sensation de présence soit corrélée avec le comportement du sujet et la mise en jeu de processus et stratégies similaires à la situation réelle (Burkhardt et al., 2003 ; Mestre &

Fuchs, 2006 ; van Baren & IJsselsteijn, 2004). Une double mesure, subjective et objective, de la présence permettrait ainsi de s'intéresser (en partie) au caractère multidimensionnel du phénomène.

## 2. Les simulateurs de conduite moto et leur (domaine de) validité

Afin de mieux comprendre les enjeux des différentes caractéristiques propres à chacun des simulateurs qui seront présentés, une brève introduction à la dynamique d'un deux-roues motorisé est proposée dans le paragraphe suivant. Pour maintenir un état de stabilité, le motocycliste prend en considération les différentes forces qui vont s'exercer sur son véhicule et influencer en retour ses actions, telles que l'inertie, la force gyroscopique et la force centrifuge.

En situation de conduite en ligne droite, cette stabilité est assurée uniquement par le contrôle de la vitesse longitudinale en raison de l'action conjuguée de la chasse<sup>3</sup> et de l'effet gyroscopique qui permet à la moto de rester en équilibre quand elle roule. L'effet gyroscopique, du à la rotation des roues qui génère une quantité de mouvement angulaire, tend à conserver la position de l'axe de rotation des roues, maintenant ainsi la moto droite. Cet effet est d'autant plus important que la vitesse de rotation des roues est élevée. Lors d'un changement de direction (e.g., prise de virage), l'état d'équilibre est obtenu par la compensation de l'ensemble des forces s'exerçant sur le véhicule. Pour provoquer un changement de direction, le motocycliste effectue une manœuvre connue sous le terme de « contre-braquage ». Selon cette manœuvre, le conducteur tourne, dans un premier temps et de façon momentanée, le guidon dans la direction opposée à celle recherchée afin de rompre la situation d'équilibre (provenant de l'effet gyroscopique s'exerçant sur la roue avant) et provoquer un changement de position de la roue avant et donc une inclinaison de la moto. Cette prise d'angle en roulis permet de compenser la force centrifuge (force poussant le véhicule vers l'extérieur du virage due à son inertie) afin de maintenir la stabilité durant le virage. L'angle d'inclinaison est d'autant plus grand que la vitesse est élevée (pour les petites inclinaisons, l'angle augmente avec le carré de la vitesse) et que le rayon de courbure du virage est petit. En sortie de virage, c'est cette même force gyroscopique qui permet au deux-roues motorisé de se redresser. Selon Cossalter (2002), bien que le contrôle de la moto puisse s'effectuer également par les mouvements du corps du conducteur (ce qui modifie l'inertie du système moto-conducteur) ou à travers des changements de vitesse, le couple appliqué sur le guidon constitue la source principale du contrôle du véhicule (Belmonte, 2001).

Il apparaît, néanmoins, sur la base des déclarations des conducteurs, que cette manœuvre de contre-braquage est principalement enseignée et utilisée pour des manœuvres d'urgence (évitement) puisqu'elle permet de faire virer le véhicule rapidement et avec peu de levier (actions uniquement sur le guidon). Les conducteurs déclarent au contraire (mais cela reste à confirmer dans la mesure où aucune étude ne s'est intéressée aux modes de contrôle d'un deux-roues en situation réelle) agir sur leur véhicule par différentes actions (qui sont

---

<sup>3</sup> La chasse correspond à la distance au sol entre l'axe de la colonne de direction et la verticale passant par l'axe de la roue avant.

probablement complémentaires de celles réalisées sur le guidon, et dont l'influence respective doit être difficile à mesurer). Ils affirment déclencher un virage par des mouvements du haut du corps (pour déplacer le centre de gravité du couple moto-conducteur), par pression sur le réservoir avec les genoux, par pression sur les repose-pieds ou encore par une pression dirigée vers le bas sur le guidon.

Ces actions déclarées et leurs conséquences attendues en termes de comportement et de trajectoire du véhicule soulignent la complexité de mise en œuvre d'un modèle dynamique de véhicule sur simulateur de deux-roues motorisé. De plus, chaque simulateur est un prototype unique, ce qui explique de manière implicite la diversité des modèles implémentés sur simulateur. Rappelons que le calcul d'un modèle dynamique de véhicule constitue l'une des étapes les plus complexes de la chaîne de simulation. Entre l'action du conducteur sur les commandes et le déplacement de la plateforme mobile du simulateur, différentes étapes de calcul sont nécessaires. De manière simplifiée, on distingue quatre étapes : (i) *l'acquisition des signaux d'entrée* (i.e., actions du conducteur sur les commandes) ; (ii) *le modèle dynamique de véhicule*, qui repose souvent sur un modèle de véhicule réel et qui permet de calculer la réaction du véhicule réel suite aux actions du conducteur (i.e., calcul de la dynamique « d'une moto virtuelle ») ; (iii) *la stratégie de commande*, connu également sous le nom d'« *algorithme de restitution inertielle* » (dont le « *filtre Washout* » est l'exemple le plus connu), qui va transformer les trajectoires générées par le modèle dynamique de véhicule en trajectoire réalisable (i.e., commandes), dans les limites de déplacements des actionneurs ; et (iv) *déplacement de la plateforme mobile par les actionneurs*.

Principalement en raison d'un besoin de connaissances important pour améliorer la sécurité des usagers de deux-roues motorisés, équipes de recherches et constructeurs se sont tournés ces dix dernières années vers la construction de simulateurs de deux-roues motorisés dynamiques, dotés de systèmes de restitution du mouvement plus ou moins complexes. Il semble donc important d'en connaître les caractéristiques singulières et les raisons de leur développement afin de situer parmi ceux-ci le simulateur IFSTTAR.

D'autre part, seules cinq études ont, à notre connaissance, effectué des travaux de validation de simulateurs moto. Parmi ces études, différents types de validité et fidélité (absolue/relative, physique, subjective ou objective ; pour une revue complète des concepts, voir Dagonneau, 2012) ont été étudiés et selon différentes approches. Certaines de ces études se sont concentrées seulement sur des analyses subjectives (Yamasaki et al., 1998), d'autres sur une combinaison de mesures subjectives et objectives (Cossalter et al., 2010, 2011; Kageyama & Tagami, 2002; Stedmon et al., 2009). Après avoir présenté l'architecture des simulateurs s'y rapportant, les études de validation/évaluation seront présentées.

## **2.1. Architecture des simulateurs de conduite moto**

Les principales caractéristiques des différents simulateurs évoqués sont présentées de manière synthétique dans le Tableau 2.

### **2.1.1. Le simulateur de l'Université de Tokyo**

Au début des années 2000, l'université de Tokyo a développé un simulateur moto dans le but de pouvoir reproduire une sensation de conduite d'une moto réelle jugeant le mécanisme des premiers simulateurs japonais (simulateurs Honda) non efficaces pour parvenir à ce but. Le simulateur repose sur l'utilisation d'une plate-forme mécanique parallèle à vérins hydrauliques de type Gough-Stewart à 6 ddl (Chiyoda et al., 2000). Ce type de plate-forme (Figure 1) est très souvent utilisé dans le domaine de la simulation de conduite automobile ou de vol. En effet, ce système de restitution, combinant mouvements en rotation et mouvements horizontaux (de petite amplitude), permet de choisir le centre des rotations en roulis, tangage et lacet du simulateur moto. L'importance de cette caractéristique pour la simulation de conduite a été suggérée par Yamasaki et al. (1998) montrant que la perception du mouvement propre (*e.g.*, accélérations perçues par l'utilisateur) peut être directement affectée par la position du centre de rotation. De plus, cette architecture permet de limiter les erreurs de mesure et de positionnement et offre la possibilité de déplacer des charges importantes (châssis d'un véhicule réel, cockpit d'avion, voiture ou moto) mais implique une commande complexe à mettre en oeuvre en raison de leur comportement hautement non-linéaire (Nehaoua, 2008).

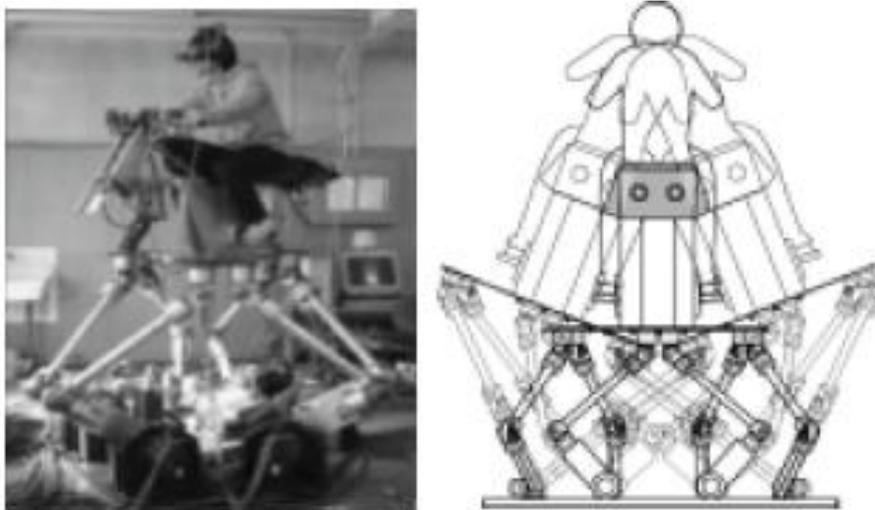


Figure 1 – Simulateur deux-roues de l'Université de Tokyo. Extrait de Chiyoda et al. [2000].

Le centre de rotation des mouvements a été positionné sur ce simulateur au niveau de la tête du conducteur (Chiyoda et al., 2000). Habituellement, le centre de rotation (*e.g.*, simulateur Honda) est situé dans la partie basse de la plate-forme mobile. Ce choix a été fondé sur la supposition communément admise que le conducteur d'une moto ne ressent presque pas d'accélération angulaire de roulis lorsqu'il prend un virage en situation réelle puisque le conducteur essaie de garder sa tête stationnaire par rapport à l'horizon autant que possible. Chiyoda et al. (2000) précise ainsi que ce positionnement permet de limiter les mouvements indésirables d'oscillations de la tête et la perception des accélérations angulaires. Les auteurs ajoutent finalement que ce choix reposait également sur la supposition que la reproduction de mouvements similaires à ceux d'une moto réelle générerait et garantirait une reproduction des sensations de conduite éprouvées sur une moto en situation réelle.

Le modèle de véhicule conçu par Katayama (1996) qui combine des modèles conducteurs et motos différents selon les actions réalisées par le conducteur a été utilisé pour simuler le comportement dynamique de la moto (Chiyoda et al., 2000). Ce modèle se fonde partiellement sur le modèle dynamique linéaire développé par Sharp (1971). Les algorithmes de contrôle de la plate-forme mobile ont été séparés en deux parties (*i.e.*, « *motion planner* » et « *washback* ») de manière à suivre leur positionnement théorique présenté ci-dessus. Le mouvement de la plate-forme mobile était donc calculé à partir des équations du mouvement d'une moto réelle. De plus, afin de dissimuler les limites de la plage de mouvement du simulateur, ce dernier retournait en position neutre sans que le conducteur ne le perçoive au moyen d'une manœuvre appelée « *washback* » (Chiyoda et al., 2000). Le dispositif de restitution visuelle reposait sur l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle. Ce casque était muni de capteurs enregistrant la position de la tête de manière à fournir à l'utilisateur une image du monde virtuel cohérente avec les mouvements effectués. Ce simulateur était également équipé d'un système audio permettant d'adapter la source d'émission des bruits extérieurs selon la position de la tête du conducteur.

### 2.1.2. Le simulateur de l'Université Nihon

Le simulateur de l'Université Nihon (Kageyama et Tagami, 2002) a été développé à la fin des années 90 dans le but d'étudier le comportement des conducteurs. Ce simulateur a 3 ddl : tangage ( $\pm 15$  degrés), roulis ( $\pm 20$  degrés) et rotation du guidon ( $\pm 10$  degrés). Le système de restitution visuel repose sur un écran plat positionné face au simulateur allouant un angle latéral de champ de vision de 150 degrés et un angle vertical de 35 degrés. Comme le simulateur Honda (prototype 2), une partie de l'inclinaison en roulis de la moto virtuelle est restituée par une inclinaison de l'horizon visuel et une autre partie par le mouvement de roulis du châssis du simulateur. Le système de restitution sonore restitue un son spatialisé. De plus, le simulateur est également doté d'un système de restitution de vent.

### 2.1.3. Le simulateur DIGEM (Université de Padoue)

Le Département d'Innovation en Mécanique et Management (DIGEM) de l'université de Padoue en Italie a entrepris en 2000 le développement d'un simulateur moto en vue d'étudier les interactions homme-véhicule dans des conditions sécuritaires. Le simulateur permet une restitution de mouvement selon 5 ddl : lacet ( $\pm 20$  degrés), roulis ( $\pm 20$  degrés), tangage ( $\pm 10$  degrés), mouvement latéral ( $\pm 0,3$  m), et rotation du guidon ( $\pm 20$  degrés). L'architecture mécanique du simulateur (Figure 2) consiste premièrement en une cage cubique qui soutient le mouvement du châssis du simulateur au moyen de quatre câbles d'acier suspendus. Cette architecture est censée réduire les forces de frottement et permettre une distribution équitable du poids de la structure sur les différents câbles. La cage permet une rotation en roulis grâce à sa fixation (à l'avant et à l'arrière) à un support extérieur au moyen de deux points pivots. L'axe de roulis passe ainsi par le centre des masses du système afin d'éviter tout tremblement induit par les câbles en acier (voir Cossalter et al., 2004, pour plus de détails sur l'architecture mécanique). Le simulateur est également doté de capteurs d'effort permettant au conducteur un mode de contrôle du véhicule par l'inclinaison de son corps (Cossalter et al., 2010).

Les actions de contrôle du conducteur sont transférées au modèle multi-corps temps réel du simulateur qui contient 14 ddl (pour plus de détails, voir Cossalter et al., 2010). La dynamique simulée est ensuite filtrée par un filtre washout (*i.e.*, transformation des trajectoires générées par le modèle virtuel de la dynamique moto, notamment les grands déplacements, en commandes pour les différents actionneurs dont les déplacements sont limités) et les données filtrées sont envoyées à une unité de contrôle qui effectue les mouvements désirés. Le système de mouvement est assuré par des servomoteurs qui pilotent les 5 axes du simulateur.

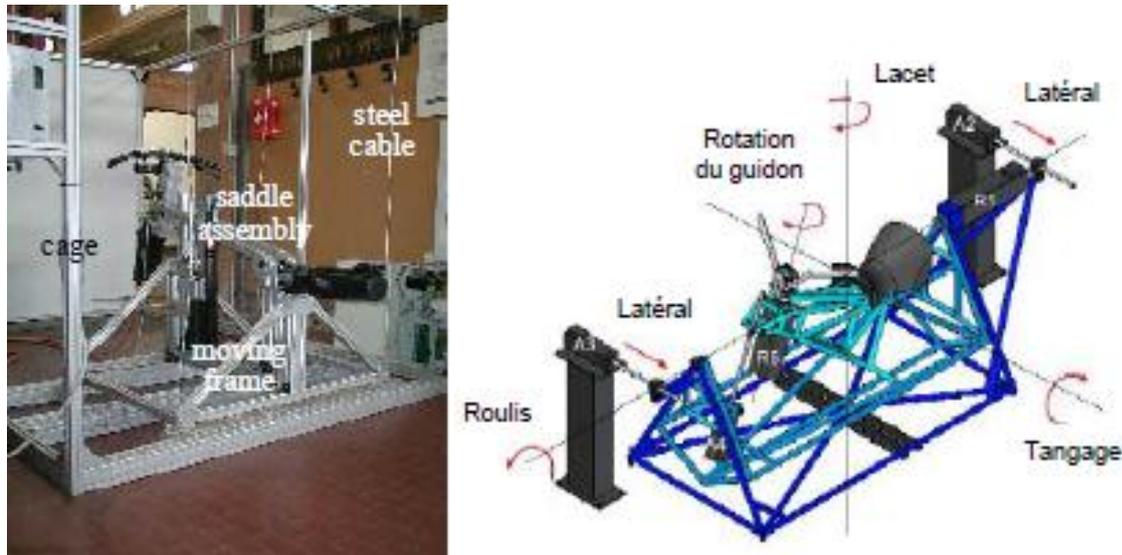


Figure 2 – Architecture du simulateur DIGEM.

Le système de restitution visuelle de ce simulateur (Figure 3) repose sur trois écrans de projection (1,5 x 2 m) couvrant un champ visuel horizontal de 240 degrés afin d’optimiser



Figure 3 – Simulateur DIGEM.

La perception de la vitesse propre (Cossalter et al., 2010). Auparavant, le système de restitution visuelle reposait sur un seul écran de projection de 2 x 2 m (Cossalter et al., 2004).

Comme le simulateur Honda (prototype 2), une partie de l'inclinaison en roulis de la moto virtuelle est restituée par une inclinaison de l'horizon visuel et une autre partie par le mouvement de roulis du châssis du simulateur. Le système de restitution sonore restitue un son spatialisé.

#### 2.1.4. Le simulateur Honda Riding Trainer

Dans la même lignée que leurs précédents développements de simulateurs, Honda a récemment développé un simulateur bas coût et non immersif, le SMARTrainer (Safe Motorcyclist Awareness and Recognition Trainer), également connu sous le nom de Honda Riding Trainer (Figure 4).

Les objectifs de la conception d'un tel simulateur étaient d'enseigner aux novices les habiletés psychomotrices et cognitives nécessaires à la conduite d'une moto (et en particulier la reconnaissance de situations dangereuses) et de fournir un dispositif permettant d'évaluer les capacités de conduite. Ce simulateur très rudimentaire à base fixe (pas de système de restitution inertielle) est composé d'une selle inspirée de celle d'une moto, de repose-pieds avec frein arrière et sélecteur de vitesse et d'un guidon incluant différentes commandes (frein avant, embrayage et accélérateur). Ce simulateur très compact et léger (29 kg) et doté d'un prix de lancement volontairement bas (3000 euros) a été commercialisé dès 2006 et s'adressait en priorité aux centres de formation.



Figure 4 – Simulateur Honda Riding Trainer.

#### 2.1.5. Le simulateur MotorcycleSim (Université de Nottingham)

Le simulateur moto le plus récent a été développé en 2008 par l'Université de Nottingham (Angleterre) pour étudier à la fois les aspects ergonomiques d'une moto et les aspects humains (comportements des conducteurs). Ce simulateur (Figure 5) est équipé d'un châssis de moto de type sportive (Triumph Daytona 675) et de toutes les commandes et organes de

contrôle. Au cours du développement, l'accent a été mis principalement sur le mouvement de roulis ( $\pm 25$  degrés). En revanche, aucun mouvement de lacet ou encore de tangage n'est restitué. Ce simulateur permet ainsi de restituer des mouvements selon seulement 2 ddl (roulis et retour d'effort guidon). Les actionneurs (deux paires) utilisés pour restituer les mouvements de roulis sont pneumatiques.

Deux modes d'opération du simulateur peuvent être mis en œuvre : un mode « statique » et un mode « dynamique ». Dans le premier mode, les actionneurs pressurisés à 10 Bar ne permettent pas d'inclinaison du simulateur produisant ainsi un haut degré de stabilité. Toutefois, Stedmon et al. (2011) précisent que cette stabilité n'est pas totale et que les utilisateurs peuvent déplacer le poids de leur corps sur la moto comme ils le feraient en situation réelle. En mode dynamique, chaque paire d'actionneurs opère de manière réciproque pour contrôler l'inclinaison de la moto en roulis et permettre une inclinaison du conducteur de -25 degrés à +25 degrés en 0,8 s. Le modèle dynamique de véhicule mis en œuvre sur ce simulateur a été développé par Meijaard et al. (2007), et repose principalement sur la prise en compte des forces centrifuge, gyroscopique et de la géométrie de la moto afin de déterminer les forces à restituer par les actionneurs. Avec ce modèle, le véhicule se conduit par la technique de contre-braquage.

Les scénarii simulant la conduite sont projetés sur un écran plat ( $\pm 2,5$  m<sup>2</sup>). Lorsque le conducteur négocie un virage, l'inclinaison en roulis de la moto virtuelle est restituée par une inclinaison de l'horizon visuel ( $\pm 25$  degrés). Le système de restitution sonore repose sur un ensemble d'enceintes qui délivrent un son spatialisé.



Figure 5 – Architecture du simulateur MotorcycleSim.

**Tableau 2 : Caractéristiques des principaux simulateurs de conduite moto.**

	Université de Tokyo	Université Nihon	DIGEM	Honda Riding Trainer	MotorcycleSim	IFSTTAR
But	Sensation de conduite d'une moto réelle	Etude des comportements conducteurs	Interaction homme-véhicule	Formation	Ergonomie d'une moto + Etude des comportements conducteurs	Formation + Etude des comportements conducteurs
Châssis de moto	ND	ND	Non	Non	Oui	Oui
Nombre de DDL	6	3	5	1	2	4
Tangage (°)	ND	± 15°	± 10°	--	--	± 8°
Lacet (°)	ND	--	± 20°	--	--	± 6°
Roulis (°)	ND	± 20°	± 20°	--	25°	± 12
Guidon (°)	ND	± 10°	± 20°	Oui-ND	ND	± 40°
Déplacements latéraux / verticaux / longitudinaux (m)	ND	-- / -- / --	0.3 / -- / --	-- / -- / --	-- / -- / --	-- / -- / --
Types de véris	Hydrauliques	ND	--	--	Pneumatiques	Electriques
Localisation du centre de rotation en roulis	Tête	ND	Tête	--	Point de contact pneu/chaussée	Réglable (3 positions)
Capteurs d'effort	ND	ND	Oui	--	ND	Oui
Modèle de véhicule	Dynamique moto réelle - Katayama (1996)	Dynamique d'une moto réelle – modèle adapté de Sharp (1971)	Dynamique moto réelle – Cossalter et al. (2002, 2004, 2010)	ND	Dynamique d'une moto réelle - Meijaard et al. (2007)	Basé sur les principes fonctionnels de la conduite moto
Contre-braquage	ND	ND	Oui	Non	Oui	Oui
Caractéristiques de la restitution visuelle	Casque de réalité virtuelle (HMD)	1 écran plat	1 écran semi-cylindrique	1 écran d'ordinateur	1 écran plat	1 à 6 écrans (180 x 280 cm)
Champ de vision latéral	ND	150°	240°	ND	~ 2.5 m <sup>2</sup>	72 à 360°
Validation	ND	Kageyama et Tagami (2002)	Cossalter et al. (2010)	ND	Stedmon et al. (2009)	

Note : ND : donnée non disponible ; '--' : caractéristique absente sur le simulateur.

## 2.2. Etudes de validation des simulateurs moto

Ayant leur travail sur l'optimisation de la restitution inertielle, Yamasaki et al. (1998) ont étudié l'influence de la position des centres de rotation et de l'amplitude des mouvements d'inclinaison sur la validité expérientielle, pour le roulis et tangage. Dans un premier temps, Yamasaki et al. (1998) ont cherché à déterminer quelle était la position des centres de rotation du roulis et tangage produisant des sensations de conduite réalistes. A cette fin, différentes hauteurs du centre de rotation de roulis ont été testées (au niveau de la route, 15, 30 et 50 cm au-dessus). Pour le centre de rotation du tangage dont la hauteur était fixée à 30 cm, la distance horizontale entre le centre de rotation et les hanches du sujet a été manipulée (entre 20 à 50 cm devant le centre des hanches du conducteur assis sur le simulateur). La vitesse de déplacement a également été manipulée (basses vitesses - en deçà de 25 km/h - et vitesses moyennes et élevées - de 25 à plus de 60 km/h). Les participants ont évalué ces différentes positions au moyen d'échelle à 5 points questionnant le sentiment de stabilité et de contrôle directionnel. Leurs résultats ont indiqué qu'un positionnement du centre de roulis à 25 cm au-dessus du niveau de la route et du centre de tangage à 40 cm devant l'assise du conducteur permettait de générer une sensation de conduite similaire à celle d'une vraie moto. Pour ce qui concerne l'inclinaison en roulis, les valeurs testées variaient entre 0 et 15 degrés (aucune précision supplémentaire n'est fournie). Les résultats ont indiqué que la sensation d'inclinaison était meilleure avec l'augmentation de l'angle de roulis jusqu'à un angle de 12 degrés. Le pattern opposé est apparu pour la facilité à contrôler la direction, les participants jugeant le contrôle de moins en moins facile avec l'augmentation de l'angle de roulis. Les résultats ont également montré que le score associé aux angles de roulis dépendait de la vitesse linéaire pratiquée par le conducteur, que ce soit pour la sensation d'inclinaison ou la facilité de contrôle. En considérant l'ensemble des évaluations (retenant les angles où les évaluations moyennes sont supérieures à 3,5 sur 5 points), Yamasaki et al. (1998) ont conclu que l'angle de roulis doit être limité à 11 degrés pour les vitesses faibles (en deçà de 25 km/h) et 7 degrés pour les vitesses moyennes et élevées (supérieures à 25 km/h). De même, pour le mouvement de tangage, les auteurs ont indiqué qu'un angle de tangage de  $\pm 5$  degrés et une vitesse de 10 deg/s étaient nécessaires pour obtenir une sensation de tangage réaliste (Yamasaki et al., 1998).

En concentrant leur recherche sur la cohérence entre les mouvements inertiels et visuels, Kageyama et Tagami (2002) ont tenté d'établir la validité expérientielle du simulateur de l'université Nihon. Kageyama et Tagami (2002) ont développé un simulateur destiné à analyser les caractéristiques des mouvements des conducteurs et à mieux comprendre comment ils contrôlent leur véhicule. Dans un premier temps, les auteurs ont cherché à déterminer les facteurs d'échelle à implémenter au niveau du roulis visuel (inclinaison de l'image en roulis) et au niveau de la plate-forme dynamique permettant de reproduire une sensation d'inclinaison du véhicule. Alors que ces facteurs d'échelle étaient manipulés, les participants ( $n = 4$ ) devaient comparer les sensations perçues sur simulateur et sur véhicule réel, à l'aide d'une échelle en 10 points, en se focalisant principalement sur le mouvement de roulis visuel et physique. Les résultats ont indiqué que la validité expérientielle (ou validité subjective de l'expérience vécue) était maximale lorsque le roulis visuel (inclinaison de la

scène visuelle) et le roulis physique (inclinaison de la moto) étaient, respectivement, restitués avec un facteur d'échelle de 1,19 et de 2,5. Tandis qu'un facteur d'échelle égal à l'unité signifie que 100 % du mouvement réel est reproduit sur simulateur, les résultats de cette étude indiquent qu'une quantité plus importante de mouvement semble nécessaire pour percevoir des sensations identiques. Dans un second temps, les auteurs se sont intéressés à la phase de prise en main du simulateur. Ils ont, pour cela, mesuré la variation de la position latérale sur la voie lors de la conduite sur un parcours (répété 35 fois) incluant deux sections de slalom entrecoupant des lignes droites et une portion de virages (Figure 6).

Considérant que les participants étaient complètement familiarisés aux 5 derniers tours, les auteurs ont comparé l'écart entre la trajectoire cible (générée sur la base des 5 derniers tours) et la trajectoire réalisée tour après tour. Les résultats ont montré que l'écart (variation de la position latérale) tendait à diminuer avec l'augmentation du nombre de tour réalisés. Plus précisément, les résultats ont mis en évidence une diminution drastique de cet écart entre le 1er et le 3ème tour et une stabilisation au-delà de ce tour. Une fois le participant familiarisé, les auteurs ont également mesuré sa fréquence cardiaque sur le même parcours. Les résultats ont indiqué une variation de cette fréquence en fonction des exigences de contrôle imposées

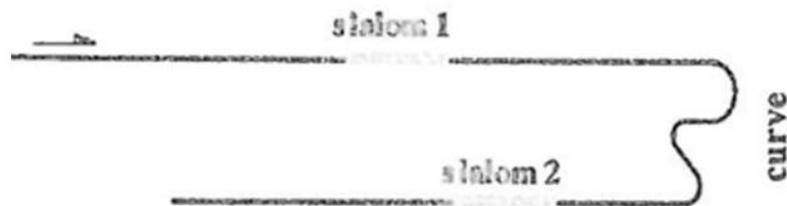


Figure 6 - Représentation schématique du parcours utilisé par Kageyama & Tagami (2002).

par le parcours. Il a ainsi été mis en évidence une augmentation de la fréquence cardiaque à l'approche de la section de slalom mais une diminution graduelle au fur et à mesure du passage de cette difficulté (car maniement du guidon constant). Alors que les auteurs concluent que ce simulateur est valide pour analyser les réactions vitales des conducteurs et qu'il reproduit bien une sensation de conduite similaire à celle d'un vrai véhicule, cette étude présente un certain nombre de limitations et pose plusieurs interrogations. Tout d'abord, la diminution importante entre le 1<sup>er</sup> et le 3<sup>ème</sup> tour n'est pas expliquée par les auteurs. On peut essayer d'expliquer cette diminution au travers soit d'un simple effet de la prise en main ou bien de l'apprentissage de nouvelles coordinations adaptées au simulateur testé. Cette dernière explication pose alors le problème des comportements étudiés sur simulateur, à savoir si les conducteurs procèdent autrement par rapport à une vraie moto. De plus, cette étude reposant sur un effectif assez réduit (quatre participants pour la première expérimentation et un seul pour la seconde) limite fortement la possibilité d'extrapoler ces résultats. Des investigations complémentaires semblent nécessaires.

Cossalter et al. (2010, 2011) ont procédé à l'évaluation du simulateur DIGEM à travers deux étapes complémentaires. Ils ont, dans un premier temps, cherché à déterminer les facteurs d'échelle à implémenter sur le simulateur afin d'optimiser le filtre washout utilisé. La sensation de conduite (inclinaison) la plus réaliste est rapportée lorsque le roulis de l'horizon visuel est proportionnellement plus important que celui du châssis de la moto.

Malheureusement, Cossalter et al. (2010) n'ont pas spécifié le ratio exact entre les roulis visuel et physique, ni la méthodologie employée pour le déterminer. La procédure d'évaluation consistait ensuite à comparer les comportements de conduite sur simulateur et sur véhicule réel (validité éthologique). L'évaluation objective a été conduite sur trois types de manœuvre (slalom, changement de voie et virage) par deux motocyclistes experts membres de leur équipe. A cette fin, différents indicateurs de performance (vitesse moyenne, angle du guidon, vitesse de roulis, etc.) ont été enregistrés sur simulateur et sur route. A travers cette évaluation, les auteurs ont montré que le simulateur DIGEM reproduit avec une bonne approximation la physique (dynamique) d'une moto réelle, les valeurs moyennes des indicateurs obtenues sur route étant comparables à celles obtenues sur simulateur. Enfin, les participants devaient juger des différentes caractéristiques (visuelle, auditive, inertielle) du simulateur. Cette évaluation subjective a été réalisée pour différentes configurations du simulateur : (i) '*Toutes caractéristiques*' (3 écrans, contrôle par les repose-pieds, filtre washout optimisé) ; (ii) '*Contrôle au guidon*' (aucun contrôle par les repose-pieds, uniquement un contrôle au guidon) ; et (iii) '*Un écran*' (présence d'un seul écran). Les participants recevaient dans un premier temps une explication détaillée du mode de fonctionnement et de contrôle du simulateur, avant de procéder à une phase de familiarisation avec le dispositif et de réaliser deux sessions de conduite dans deux environnements distincts (rural et urbain). Une fois les deux sessions de conduite sur simulateur complétées, le *Rider Feeling Questionnaire* (Cossalter et al., 2010) a été soumis aux participants. A travers ce questionnaire, différents aspects de la simulation ont été évalués à partir d'une échelle de type Likert à 5 points. Les résultats ont indiqué que les sensations (visuelle, sonore et de mouvement) perçues par le conducteur étaient augmentées par l'installation des trois écrans et l'introduction d'un mode de contrôle par les repose-pieds. Cette étude met ainsi en évidence une amélioration du ressenti des conducteurs (validité expérientielle) par l'optimisation de certains paramètres visuel, sonore et inertiel.

Avançant que le niveau de validité éthologique d'un simulateur dépend principalement de sa fidélité physique (i.e., « degré auquel le dispositif ressemble à l'environnement réel ») et fonctionnelle (i.e., « degré auquel le simulateur se comporte et réagit comme le véhicule réel »), Stedmon et al. (2011) se sont naturellement tournés vers l'évaluation de ces deux types de fidélité. Le simulateur MotorcycleSim était utilisé en mode 'statique' avec des actionneurs pressurisés à 10 Bar. La fidélité physique était manipulée au travers de deux configurations du retour visuel (horizon fixe ou horizon incliné pour représenter l'angle d'inclinaison de la moto) et la fidélité fonctionnelle au moyen de deux modes de conduite (braquage ou contre-braquage). Les participants, une fois familiarisés avec le dispositif, ont ainsi effectué quatre sessions de conduite (2 retours visuel x 2 modes de conduite). Comme pour Cossalter et al. (2010, 2011), des mesures à la fois objectives et subjectives ont été réalisées. Celles-ci reposaient sur des données relatives à la performance de conduite (e.g. nombre de sorties de route, collision avec un véhicule ou piéton, excès de vitesse, violation du feu rouge), au confort (ou inconfort) du conducteur, à la perception ou préférence du conducteur sur les conditions testées, à la charge mentale (questionnaire NASA-TLX), ainsi qu'au mal du simulateur (questionnaire élaboré par les auteurs). Les résultats ont mis en évidence un impact important du mode de conduite sur la performance de conduite et le

ressenti des conducteurs, en revanche le degré d'inclinaison de la scène visuelle s'est révélé avoir peu d'influence. En effet, leurs résultats ont indiqué qu'une majorité de participants préférait le mode de conduite « braquage » plutôt que « contre-braquage » jugeant que le simulateur se comportait de manière plus réaliste, fournissait une sensation de conduite plus « naturelle », et créait plus de plaisir. Les données comportementales allaient également dans ce sens en soulignant que le mode braquage occasionnait un nombre plus faible de sorties de route et ainsi un meilleur contrôle du véhicule. Les résultats ont de plus révélé que la plupart des participants a préféré le mode braquage combiné à une inclinaison de la scène visuelle. Au sujet de cette variable, alors que les conditions où l'horizon visuel était incliné dans la direction opposée au mouvement de la moto et celles où l'horizon visuel était maintenu horizontal (sans mouvement de roulis) ont résulté en des performances de conduite similaires, cette manipulation a eu un effet au niveau subjectif. La majorité des motocyclistes (10 sur 16) a préféré la configuration où l'horizon était incliné. Seulement deux d'entre eux ont préféré la condition où l'horizon était maintenu horizontal, alors que quatre participants n'ont pas indiqué de préférence. Stedmon et al. (2011) ont ainsi conclu que les aspects relatifs à la fidélité fonctionnelle (mode de conduite braquage ou contre-braquage) sont plus importants que ceux relatifs à la fidélité physique (inclinaison ou non de l'horizon visuel). Toutefois, les auteurs estiment que la fidélité physique ne peut pas être trop compromise même s'il juge la fidélité fonctionnelle comme étant plus importante en vue d'établir la validité comportementale du simulateur.

### **3. Problématique et objectifs généraux du projet**

En synthèse, il apparaît dans la littérature que les travaux sur les comportements des conducteurs de deux-roues et les processus sous-tendant ces comportements se multiplient rapidement. On constate, en parallèle, que l'ensemble de ces études a été réalisé avec un simulateur à base fixe (e.g., Crundall et al., 2012; Crundall et al., 2013; Di Stasi et al., 2009; Liu et al., 2009; Shahar et al., 2010) ou à partir de « mise en situation » (moto installée devant des écrans sans interaction possible avec le dispositif ; e.g., Hosking et al., 2010). Le recours à de tels dispositifs pour l'étude des comportements des conducteurs pose donc clairement la question de la validité des résultats obtenus et de leur transférabilité.

Pourtant, force est de constater que les travaux adressant le comportement des conducteurs moto en s'appuyant sur un simulateur de conduite augmentent en nombre plus vite que les travaux portant sur le domaine de validité des dits simulateurs.

L'état de l'art présentant les principaux simulateurs moto a permis de souligner qu'il existait une forte hétérogénéité dans les solutions techniques retenues pour la conception mécanique et dynamique des plates-formes mobiles. Par voie de conséquence, il n'existe donc pas encore de consensus sur les modalités du rendu inertiel et sur l'algorithme de restitution du mouvement (maintien d'une inclinaison dans le virage, restitution d'un mouvement de type « wash-out » calqué sur la simulation de vol, ou encore pas de restitution de mouvement). La présentation des principales caractéristiques des simulateurs retenus dans le Tableau 2 a mis en évidence que les modèles de véhicule virtuel étaient essentiellement basés sur la

dynamique d'une moto réelle alors que les plates-formes dynamiques présentées font face à des limites intrinsèques (en accélération comme en amplitude). La pertinence de ce type de modèles de véhicule est donc posée. Enfin, il est apparu des résultats contradictoires sur les effets d'un mode de conduite en contre-braquage qui correspond à la technique de base enseignée dans les cursus de formation à la conduite moto.

Un des objectifs de ce projet était donc de mettre au point un modèle de véhicule virtuel et de tester ses effets sur les performances de conduite (Tâche 1 - Etudes 1 et 2). En point de mire, il s'agissait en particulier de mettre au point un modèle de véhicule « piloté » à partir de la technique de contre-braquage. Différentes solutions ont été testées (modèle basé sur la dynamique d'une moto, modèle dit fonctionnel s'inspirant des contraintes fonctionnelles de la conduite, modèle de véhicule sans mouvement) qui ont systématiquement été comparées.

A l'opposé de ces considérations sur la restitution du mouvement pour la simulation de conduite moto, un consensus semble être trouvé sur la nécessité *a priori* d'introduire du roulis visuel (inclinaison de la scène dans la direction opposée à celle du virage) pour assurer l'illusion d'inclinaison. Pour Kageyama et Tagami (2002), le facteur d'échelle pour le roulis visuel doit être fixé à 1,2 (20 % de plus que si la physique était respectée) pour générer l'illusion d'inclinaison la plus crédible. Cossalter et al. (2010) ont montré que la sensation d'inclinaison la plus réaliste apparaît lorsque le roulis visuel est proportionnellement plus important que celui du châssis de la moto. Enfin, dans l'étude de Stedmon et al. (2011), la majorité des motocyclistes (10 sur 16) a préféré la configuration où l'horizon était incliné.

Alors que ce consensus s'est essentiellement établi à partir de données subjectives, l'introduction du roulis visuel va immanquablement modifier la dynamique de la scène visuelle. Se pose alors la question de ses effets sur la dynamique du regard et sur les stratégies visuelles dans le référentiel 3D de l'environnement.

Ce projet avait ainsi également pour objectif d'étudier les effets de l'introduction d'un roulis visuel sur la dynamique du regard, les stratégies visuelles et les performances de conduite lors de la prise de virage (Tâche 3 – Etudes 3 et 4). Il était donc nécessaire en amont de travailler à la communication et à la synchronisation entre l'environnement de simulation et le système d'enregistrement des mouvements oculaires (Tâche 2).

#### **4. Présentation du simulateur de conduite deux-roues IFSTTAR**

Le développement du simulateur IFSTTAR (Figure 7) a débuté en France en 2007 dans le cadre du projet SIMACOM (SIMulateur pour l'Apprentissage de la CONduite de deux-roues Motorisé), au travers d'une collaboration entre le laboratoire Modélisations, Simulateur et Simulations de conduite (MSIS, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité INRETS, Paris, France), le laboratoire Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes (IBISC, Université d'Evry Val d'Essonne, Evry, France) et le laboratoire Institut d'Electronique Fondamental (IEF, Université Paris-Sud XI, Orsay,

France). La finalité de ce simulateur était double : (i) la formation au risque de la conduite moto, en sensibilisant les conducteurs aux situations accidentogènes ; (ii) l'étude du comportement des conducteurs en conduite normale.



**Figure 7 – Simulateur moto IFSTAR.**

Le simulateur est composé d'un châssis de moto réelle (Yamaha YBR, 125 cm<sup>3</sup>). Les roues et les suspensions ont été enlevées afin de réduire la masse et l'inertie de l'ensemble du simulateur. Ce châssis est fixé sur un cadre métallique formant la partie supérieure mobile de la plate-forme du simulateur, la partie inférieure du simulateur consistant en un bâti servant de support pour le montage des actionneurs (Figure 8). L'ensemble des organes de commande d'origine (freins avant et arrière, embrayage, démarreur, klaxon, accélérateur, sélecteur de vitesse, clignotants) ont été conservés.

Le châssis de moto est monté sur 3 vérins assurant la restitution des mouvements dans les 3 axes. Les deux vérins à l'avant permettent de restituer les mouvements de tangage (lorsqu'ils sont actionnés en phase) et de roulis (lorsqu'ils sont actionnés en opposition de phase). Le vérin arrière (horizontal) permet quant à lui de restituer la rotation de lacet. Dans sa

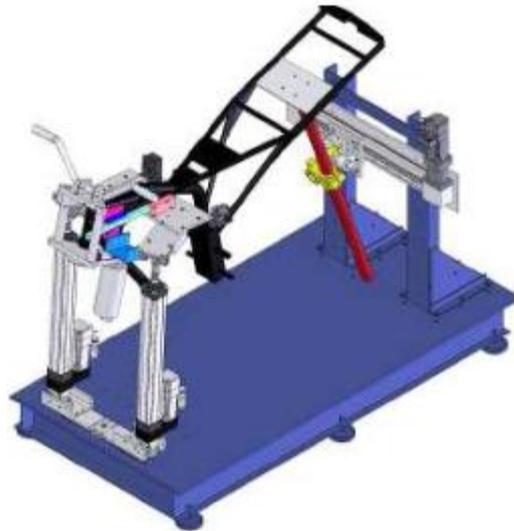


Figure 8 – Architecture du simulateur IFSTTAR.

configuration actuelle, le simulateur permet de restituer des angles maximaux de 12 degrés en roulis, 8 degrés en tangage, et 6 degrés en lacet. Le guidon de la moto fournit un double retour d'effort. D'une part, le guidon est relié à un ensemble capteur / moteur permettant de mesurer la position du guidon et d'appliquer un couple (généralement un couple résistant, c'est-à-dire allant contre le mouvement imposé par le pilote). Par la manipulation de la distance entre le guidon et le corps de la moto, couplée aux actions d'accélération et de décélération, un second retour d'effort s'inspirant de celui observé en situation réelle du fait des mouvements du buste durant les phases d'accélération et de freinage est fourni au conducteur (Figure 9).

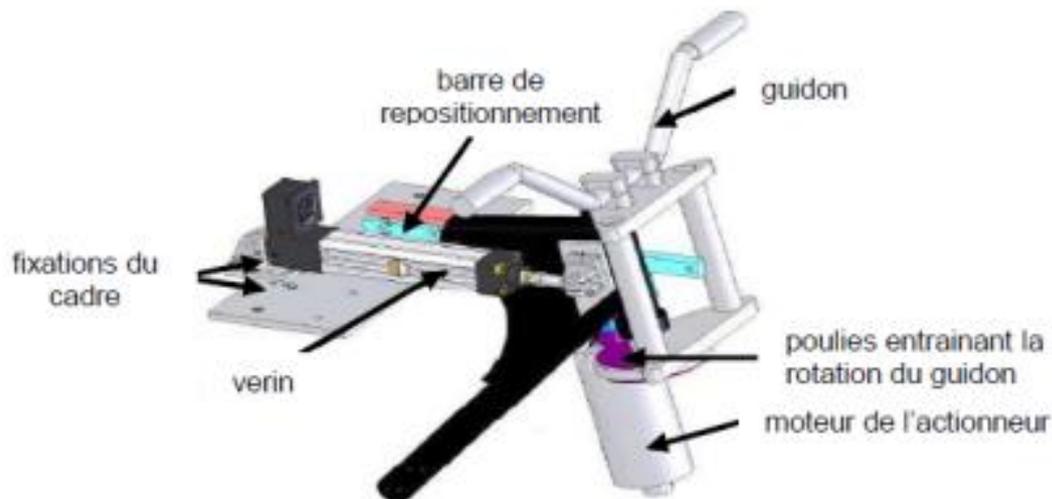


Figure 9 - Représentation du système mécanique produisant un double retour d'effort sur le guidon.

Enfin, des capteurs d'effort sont également installés entre le haut des vérins et le châssis de la moto, permettant ainsi de récupérer les informations relatives aux mouvements du motard par rapport au châssis et aux forces qu'il peut exercer (appui sur les cale-pieds, appui sur le réservoir avec les genoux...) afin de les prendre en compte dans la simulation.

## 5. Tâche 1 : Mise au point du modèle de véhicule du simulateur IFSTTAR

### 5.1. Etude 1 : Effets d'un modèle « basique », « fonctionnel » et « physique » sur les performances de conduite dans des tâches à fortes contraintes sensorimotrices

Contributeurs : Florent Colombet, Régis Lobjois.

#### 5.1.1. Problématique

Le simulateur moto a pour vocation de pouvoir à terme être utilisé pour l'étude du comportement du motard. Idéalement, un motard « lambda » doit pouvoir le prendre en main et le conduire de façon « naturelle » comme s'il s'agissait d'une moto réelle. L'hypothèse est en effet faite qu'un motard est capable de conduire n'importe quelle moto. Même si il lui faut un temps d'adaptation, il est tout de même capable de prendre une trajectoire, de rester sur sa voie etc... De la même façon, un motard doit pouvoir être en mesure de conduire le simulateur de façon naturelle, afin de garantir la validité des expérimentations visant à étudier son comportement.

Concernant la gestion du roulis (aspect le plus problématique pour la simulation de moto), le constat actuel est que les motards semblent préférer un comportement du simulateur plus basique, leur permettant de contrôler la moto virtuelle plus facilement (ou déjà simplement de la contrôler) mais pas forcément de façon réaliste. Nous avons voulu étudier cette question de façon plus rigoureuse et approfondie. Dans cette perspective, 3 stratégies de commande du simulateur ont été développées et/ou améliorées. Une expérimentation a ensuite été réalisée afin de pouvoir comparer ces différentes stratégies.

Conscients qu'il n'était pas réaliste de penser qu'une de ces stratégies de commande correspondrait pleinement et parfaitement à nos attentes (et surtout celles d'un motard), l'expérimentation ainsi montée visait également un second objectif : avoir des retours de motards sur l'état actuel du simulateur et de son comportement avec les différentes stratégies afin d'avoir des pistes d'évolution.

#### 5.1.2. Travail préliminaire sur le pilotage des vérins

##### 5.1.2.1. *Situation initiale*

A l'origine, les moteurs électriques des vérins étaient pilotés en position : à chaque nouveau pas de temps de la simulation, la position à atteindre était envoyée au moteur. Dans cette situation, les vérins étaient commandés en boucle ouverte et uniquement en position. Par défaut, la vitesse des vérins pour aller d'une position à une autre entre 2 pas de temps était alors la vitesse maximale admissible par les vérins (Figure 10).

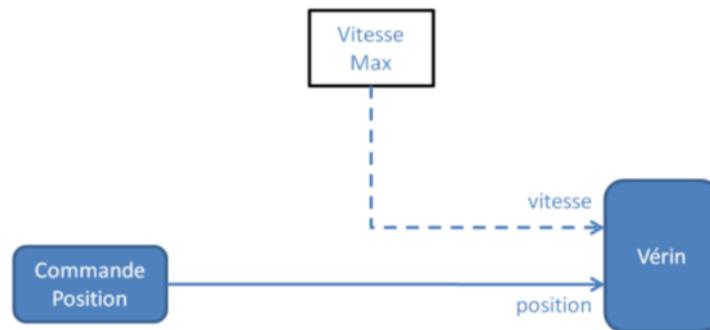


Figure 10 - Schéma illustrant la situation initiale du pilotage des vérins du simulateur.

Du fait de cette vitesse maximale, le suivi de position est très bon pour une entrée de type sinusoïde. Pour une entrée de type échelon, le temps de réponse est lui aussi très court. Par contre, on observe un dépassement qui peut être problématique.

D'autre part, dans le cas d'un déplacement à faible vitesse (sinusoïde de faible fréquence par exemple), on ressent lorsqu'on est sur la moto une sorte de « crénelage », des « vibrations » dans la course du vérin. Ce crénelage provient du fait qu'à chaque pas de temps, la tige du vérin se déplace suffisamment vite pour atteindre la position commandée avant la fin du pas de temps. La course du vérin est alors stoppée jusqu'à la fin du pas de temps, avant de reprendre au pas de temps suivant. Les « vibrations » ressenties proviennent de ces arrêts et redémarrages successifs. Toutefois, la mesure de la position du vérin se faisant à la même fréquence que le pilotage, il n'est pas possible de faire apparaître cet effet sur des courbes enregistrées pendant une simulation. On ne peut détecter ce phénomène qu'avec une mesure subjective.

#### 5.1.2.2. *Prise en compte de la vitesse consigne*

Pour réduire l'effet de « crénelage » de la course du vérin à basse vitesse, la vitesse consigne des vérins est pilotée. Au lieu de laisser la vitesse consigne au maximum (ce qui engendre les vibrations), il faut envoyer la consigne de vitesse permettant exactement au vérin d'aller à la position consigne pendant la durée du pas de temps. Si la vitesse pilotée est trop forte, le phénomène de crénelage perdure ; au contraire si elle est trop faible, le vérin ne peut atteindre la position consigne. Pour arriver à piloter convenablement la vitesse, la dérivée de la position consigne est alors envoyée (Figure 11).

Cependant, de par l'inertie du système, la position réelle des vérins est en léger décalage de phase par rapport à la consigne. La vitesse consigne envoyée n'est donc pas la bonne car elle est en phase avec la consigne (et non la position réelle). On observe alors des profils de position non désirés lors des changements de direction. En effet on peut observer un palier sur la courbe de position du vérin au moment où la courbe consigne atteint le maximum d'amplitude, c'est-à-dire lorsque la vitesse consigne s'annule. Cependant comme le vérin n'a pas atteint la position maximale de la sinusoïde (dû au déphasage), cela explique le problème de « retournement de position » qui survient après ce palier.

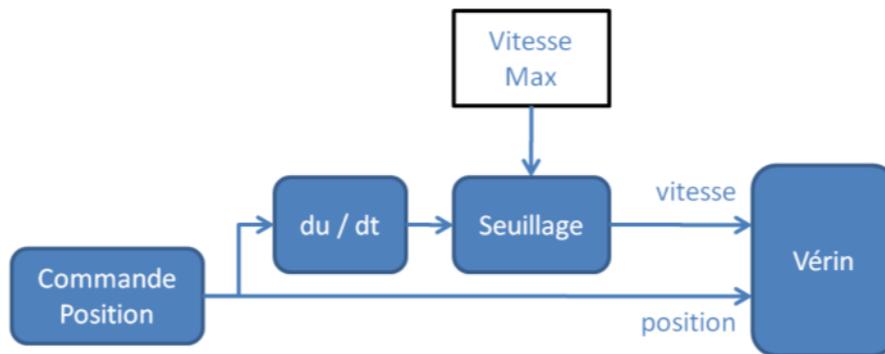


Figure 11 – Schéma illustrant la première évolution du pilotage des vérins.

D'autre part, lorsqu'on envoie une consigne de position de type échelon, la vitesse consigne correspondante étant infinie sur un instant très bref et nulle le reste du temps, on n'observe quasiment pas de déplacement des vérins (moins de 0.01 cm pour une consigne de 1 cm). La position consigne n'est donc pas du tout respectée.

### 5.1.2.3. Pilotage en boucle fermée

Pour améliorer la commande en vitesse des vérins, nous avons ajouté une composante proportionnelle à l'écart de position (gain P). Cette composante supplémentaire prenant en compte la position courante du vérin permet d'effectuer un pilotage en boucle fermée.

Lorsqu'on pilote les vérins en position et en vitesse, la vitesse est « prioritaire » par rapport à la position. En d'autres termes si la vitesse est toujours nulle, la tige du vérin ne se déplacera pas. Pour réguler la commande du vérin en boucle fermée, c'est donc bien la vitesse de commande qu'il faut modifier. En rajoutant une composante (gain P) proportionnelle à l'écart de position entre la commande et la position courante, on rajoute un terme permettant à la vitesse de ne jamais être nulle tant que la position consigne n'est pas atteinte. Ainsi on est assuré de toujours converger vers la position consigne (Figure 12).

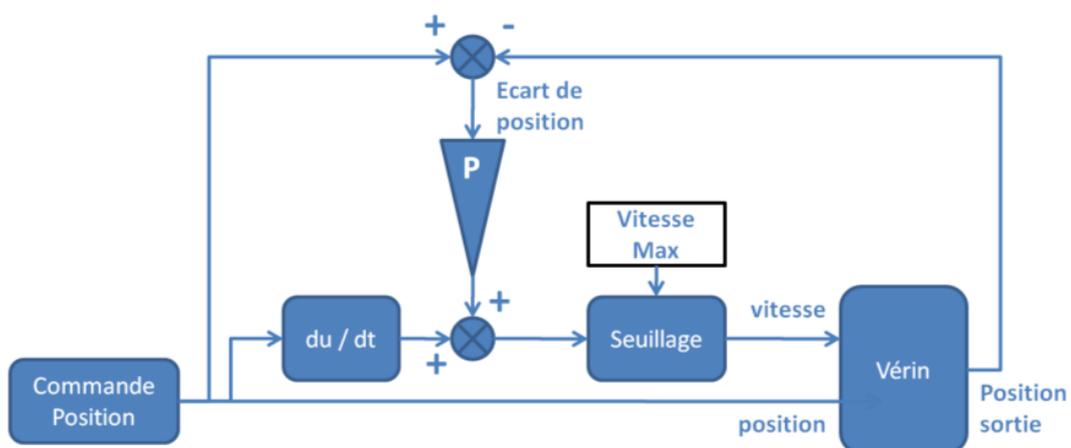


Figure 12 – Pilotage des vérins à partir de la vitesse et de leur position courante.

Il faut toutefois régler correctement le gain P. Un gain trop faible minimise l'action correctrice et nous ramène dans une situation proche du cas précédent de pilotage en boucle ouverte (avec une vitesse consigne égale à la dérivée de la position consigne). Au contraire,

un gain trop fort engendrera des vitesses consignes trop importantes et provoquant à nouveau un ressenti « crénelé » lors des mouvements du vérin.

### 5.1.3. Stratégies de commande développées

Pour répondre à la problématique proposée, trois stratégies de commande ont été développées. La stratégie « basique » repose sur un fonctionnement assez simple, similaire au Honda Rider Training et proche d'un jeu vidéo. Une deuxième stratégie, qualifiée de « fonctionnelle », s'appuie sur une liste de critères fonctionnels de la conduite moto. Enfin, la troisième stratégie cherche elle aussi à reproduire un comportement de moto plus « réaliste » en se basant sur une modélisation physique du comportement dynamique d'une moto.

#### 5.1.3.1. Architecture générale commune

Toutes les stratégies de commande du simulateur moto possèdent la même architecture générale (Figure 13). On peut la décomposer en deux grands axes : la partie pilotage en vitesse (ou contrôle longitudinal) représentée en rouge, et la partie contrôle de la trajectoire et du roulis (ou contrôle latéral), représentée en bleu.

Le contrôle de la vitesse est identique pour les trois stratégies présentées par la suite. Il se fait par les mêmes interfaces qu'une moto réelle, c'est-à-dire par la poignée des gaz, les freins, l'embrayage et le sélecteur de vitesse. Un modèle de moteur détermine alors à partir de ces entrées la vitesse et l'accélération de la moto. De cette accélération (ou du freinage) est alors déterminé le mouvement de tangage de la moto, qui est restitué sur le simulateur par les deux vérins avants actionnés en phase.

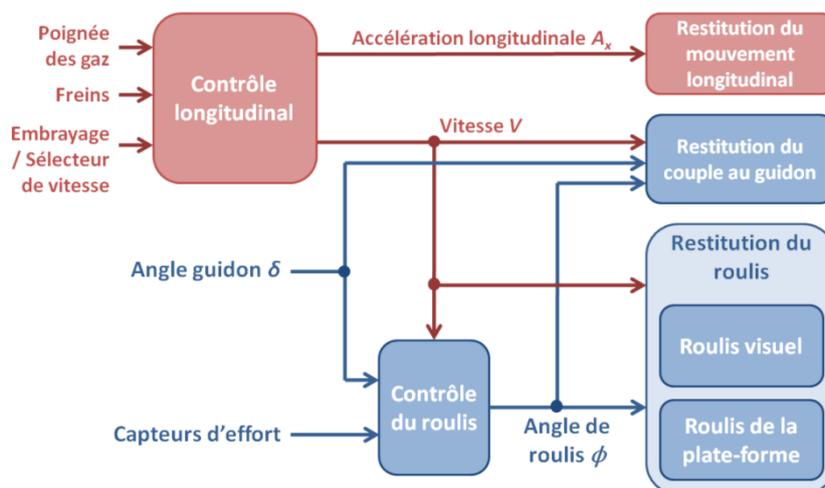


Figure 13 – Architecture générale commune aux différentes stratégies de commande développées.

Le contrôle du roulis diffère en fonction de la stratégie utilisée et sera donc détaillé dans chaque cas. Il calcule l'angle de roulis de la moto à chaque pas de temps en fonction de l'angle guidon, des valeurs renvoyées par les capteurs d'effort et de la vitesse de la moto.

Le roulis de la moto est alors restitué de deux manières (deux voies) : d'une part par la rotation physique de la plate-forme en actionnant les deux vérins avant en opposition de

phase, et d'autre part en inclinant l'horizon visuel. En effet le roulis de la moto atteint des valeurs importantes en conduite réelle (jusqu'à 35 ou 40 degrés) car il sert à compenser l'accélération centrifuge (horizontale et en direction de l'extérieur du virage). En simulation, cette accélération centrifuge est absente et en inclinant le simulateur autant qu'une moto réelle, le motard a alors l'impression de tomber plutôt que d'être dans un « équilibre incliné ». C'est pourquoi on utilise l'inclinaison de l'horizon visuel pour procurer la sensation d'inclinaison sans pour autant procurer la sensation de chute. Toutefois la répartition entre roulis physique et roulis visuel en fonction de l'angle de roulis et de la vitesse, ainsi que le sens de rotation du roulis visuel sont encore des sujets de recherche ouverts.

Dans notre cas, à part dans la stratégie basique où le roulis n'est restitué que visuellement, nous avons choisi d'utiliser la même façon de restituer le roulis pour les stratégies fonctionnelle et physique (Figure 14):

- Les « quantités » de roulis restituées visuellement et par la plate-forme sont proportionnelles au roulis de la moto virtuelle. Les coefficients de proportionnalité (ou gains) ne sont cependant pas constants. Ils varient en fonction de la vitesse de la moto. *Note : la stratégie basique peut donc être considérée comme un cas particulier où le « gain visuel » est constamment de 1 et le « gain plate-forme » est constamment de 0.*
- De 0 à 15 km/h, le roulis est restitué intégralement par la plate forme. L'horizon visuel reste ainsi stable lorsque la moto virtuelle est à l'arrêt ou à faible vitesse. Il a en effet été constaté de façon empirique que pour cette gamme de vitesse, le mal du simulateur était réduit de cette façon.
- Au-delà de 60 km/h, le roulis est restitué à 80% visuellement et à 20% par la plate-forme. Par exemple, si en situation réelle, une moto est inclinée de 10°, en simulation, l'horizon visuel sera incliné de 8° et la plate-forme de 2°. Le pourcentage restitué par la plate-forme est volontairement faible afin de réduire l'amplitude des mouvements pour prévenir la sensation de chute du motard et éviter également d'atteindre les limites physiques du simulateur.
- Entre 15 et 60 km/h, les pourcentages restitués visuellement et par la plate-forme augmentent linéairement de 0 à 80% pour le visuel, et de 100 à 20% pour la plate-forme.
- Dans tous les cas, la somme des angles de roulis restitués physiquement et visuellement équivaut à 100% du roulis de la moto.

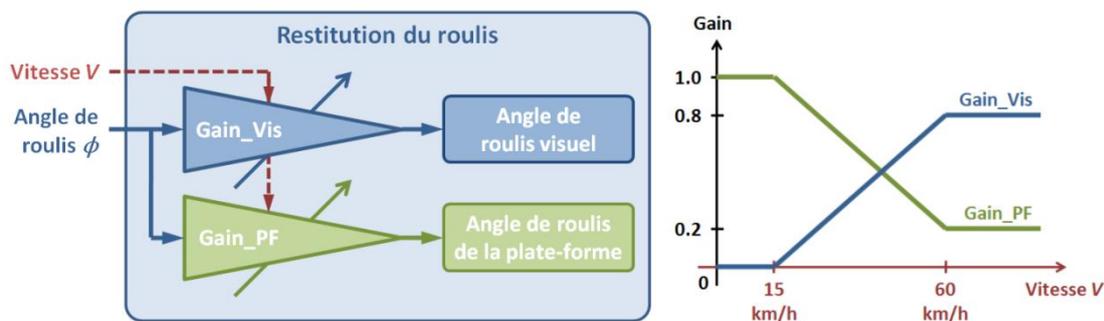


Figure 14 – Restitution du roulis sur le simulateur 2RM.

Enfin, dernier aspect de l'architecture générale commune aux trois stratégies, le retour d'effort au guidon se fait en utilisant un modèle de ressort de torsion (Figure 15). Le couple exercé sur le guidon par le système vise à ramener le guidon à sa position d'équilibre  $\delta_0$ . La valeur du couple est proportionnelle (gain  $K$ ) à l'écart entre l'angle actuel du guidon  $\delta$  et l'angle  $\delta_0$ . La valeur de la position d'équilibre  $\delta_0$  diffère en fonction de la stratégie de commande utilisée, et peut notamment être fonction de la vitesse  $V$  de la moto et de son angle de roulis  $\Phi$ .

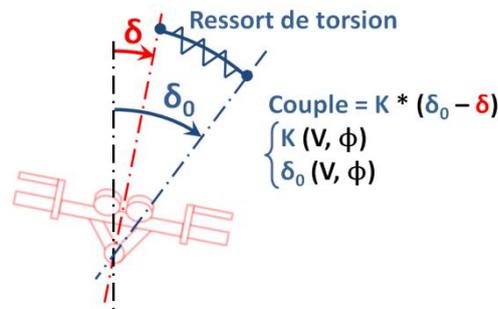


Figure 15 – Illustration du ressort de torsion utilisé pour le retour d'effort au guidon.

#### 5.1.3.2. Stratégie « basique »

Le principe général de cette stratégie (Figure 16) est de proposer un contrôle le plus simple possible, similaire à celui du Honda Riding Trainer. Ainsi la moto se contrôle uniquement avec le guidon, dans un mode dit de « braquage » (tourner le guidon à gauche pour tourner à gauche), les valeurs renvoyées par les capteurs d'effort n'étant pas prises en compte. Le rayon de courbure  $R_C$  de la trajectoire suivie par la moto dépend alors de l'empattement  $p$  de la moto et de l'angle guidon  $\delta$ :

$$R_C = \frac{p}{\tan \delta}$$

L'inclinaison en roulis de la moto  $\Phi$  dépend alors de ce rayon de courbure et de la vitesse : elle est calculée de telle sorte à compenser la force centrifuge qui tend à pousser la moto vers l'extérieur du virage.

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{V^2}{g \cdot R_C} \right)$$

Dans cette configuration, le simulateur restant statique (pas de restitution physique par la plate-forme, elle reste constamment verticale), la restitution du roulis de la moto virtuelle ne se fait que visuellement. L'horizon visuel est par conséquent systématiquement incliné de l'angle d'inclinaison de la moto.

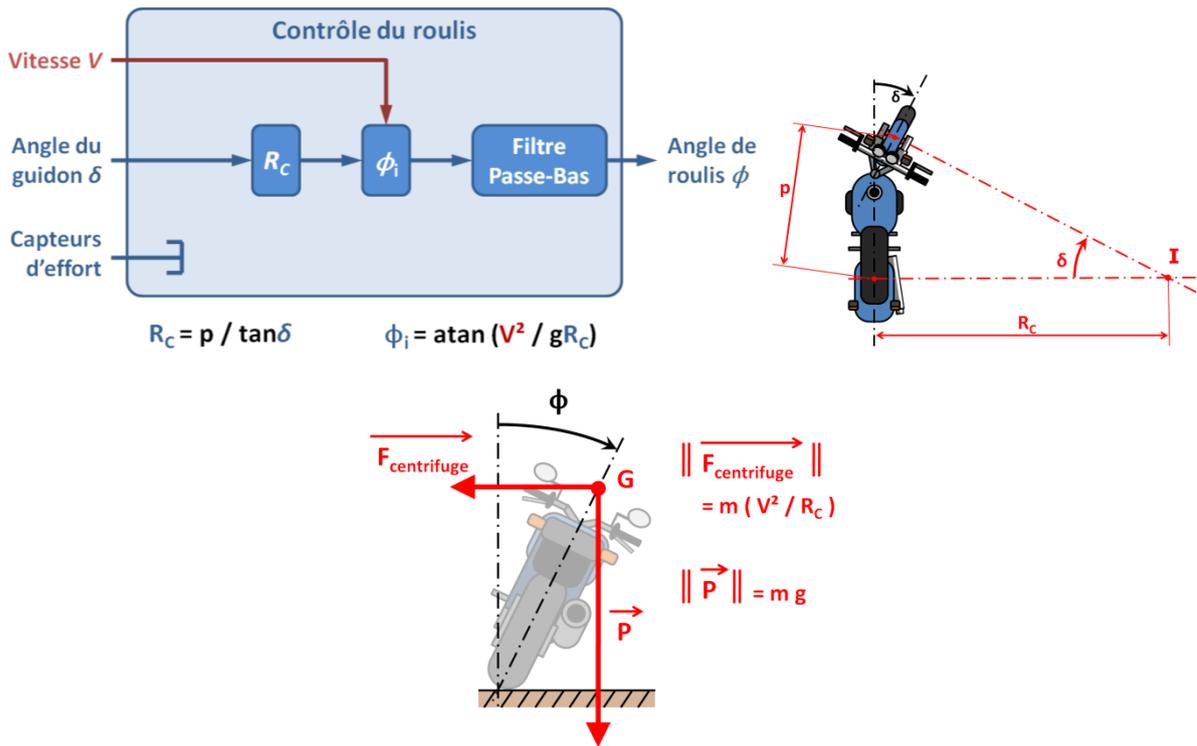


Figure 16 – Illustration du contrôle en roulis de la moto dans le cas de la stratégie basique. Le rayon de courbure de la trajectoire ne dépend que de l'angle du guidon, et l'angle de roulis est déterminé de sorte à ce que la force centrifuge soit compensée et que la moto soit en « équilibre ».

### 5.1.3.3. Stratégie « fonctionnelle »

La stratégie « fonctionnelle » proposée ici est basée sur une approche fonctionnelle, c'est-à-dire que le fonctionnement du simulateur a été conçu de telle sorte qu'il reproduise le « comportement attendu » d'une moto par un motard. Ce « comportement attendu » a été déterminé avec des motards experts du laboratoire. Voici les différentes « règles » qui ont été établies et sur lesquelles se base cette stratégie.

1. A partir d'une position verticale, le motard peut incliner sa moto :
  - a. Soit avec les actions de son corps sur la moto elle-même,
  - b. Soit avec des actions sur le guidon.
2. A vitesse moyenne ou élevée, le motard peut utiliser la technique de contre-braquage pour incliner sa moto :
  - a. Quand il/elle pousse sur la poignée gauche, la moto s'incline sur la gauche.
  - b. Plus le motard pousse fort sur la poignée, plus la moto va s'incliner rapidement.
3. Plus la vitesse est élevée, plus il est difficile de tourner le guidon (et ainsi moins le motard tourne le guidon).
4. Comme l'angle du guidon est généralement faible, la trajectoire est principalement basée sur l'angle de roulis et la vitesse de la moto. Ces deux paramètres suffisent pour déterminer le rayon de courbure de la trajectoire en faisant l'hypothèse d'être à l'état d'équilibre.

5. Dans un virage, le guidon tend à tourner dans le sens du virage (phénomène d'entraînement).
6. A part à très faible vitesse, la moto est « naturellement stable » : l'angle de roulis tend vers zéro (moto verticale) si le motard n'intervient pas.
7. En sortie de virage, le motard peut redresser sa moto soit en ré-accélérant, soit en utilisant les mêmes principes que pour la règle n°1.
8. Lorsque le motard est à l'arrêt ou à très basse vitesse, il peut sentir le frottement entre le pneu et la chaussée lorsqu'il tourne le guidon.
9. Lorsqu'il accélère ou qu'il freine, un motard perçoit une rotation de tangage.

La Figure 17 présente la structure du contrôle en roulis utilisé dans la stratégie fonctionnelle permettant de vérifier les différents critères énumérés précédemment.

- L'angle de roulis  $\Phi$  de la moto dépend à la fois de l'angle du guidon et des valeurs renvoyées par les capteurs d'effort.
- Le terme  $\frac{K_1}{V}$  minimise l'action des capteurs d'effort lorsque la vitesse augmente. Ainsi, la moto devient plus « stable » avec la vitesse.
- Le terme  $K_2 * V$  va au contraire augmenter l'influence de l'angle du guidon avec la vitesse. Ainsi, plus la vitesse sera grande et plus la rotation du guidon nécessaire pour incliner la moto sera faible.
- L'intégrateur retranscrit l'inertie de la moto (et favorise la stabilité du simulateur). En d'autres termes, les actions sur les capteurs d'effort et le guidon influent sur la vitesse d'inclinaison et non directement sur l'inclinaison de la moto elle-même. Le motard « lance » ou « arrête » le mouvement d'inclinaison de la moto, mais ne pilote pas directement l'angle de roulis.
- Le terme  $\delta_0$  (qui est retranché à l'angle du guidon) retranscrit la règle n°5 : le guidon a tendance à tourner dans le sens du virage. Ainsi, pour être stable dans son virage, le motard devra tourner son guidon de cet angle  $\delta_0$ . Cet angle diminue avec la vitesse (terme  $\frac{K_3}{V}$ ) pour une même inclinaison  $\Phi$  de la moto.

Ce terme  $\delta_0$  est également celui qui est utilisé dans le modèle de retour d'effort au guidon pour la stratégie fonctionnelle.

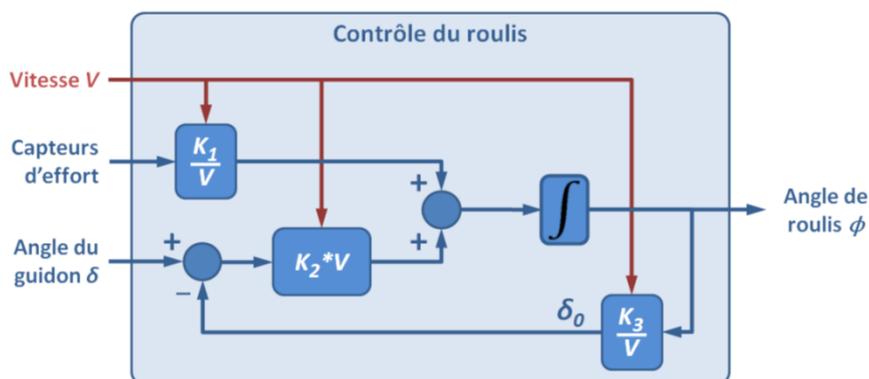


Figure 17 – Illustration du contrôle en roulis de la moto dans le cas de la stratégie « fonctionnelle ».

#### 5.1.3.4. Stratégie « physique »

La stratégie « physique » se veut basée sur un modèle physique du comportement dynamique d'une moto. On notera cependant que cette modélisation est encore un sujet de recherche ouvert aujourd'hui et qu'il n'existe pas de modèle théorique permettant de simuler parfaitement la trajectoire d'une moto réelle.

Dans le modèle simplifié utilisé ici (Figure 18), on considère que 3 forces ont une influence sur la rotation en roulis de la moto : la force centrifuge (horizontale et orientée vers l'extérieur du virage), le poids de l'ensemble moto + conducteur (vertical et orienté vers le sol) et enfin le moment exercé par le conducteur avec son corps pour redresser ou incliner la moto. L'accélération angulaire de roulis est alors déterminée avec le Principe Fondamental de la Dynamique (ou Seconde Loi de Newton). Cette accélération est intégrée deux fois pour obtenir l'angle de roulis de la moto virtuelle.

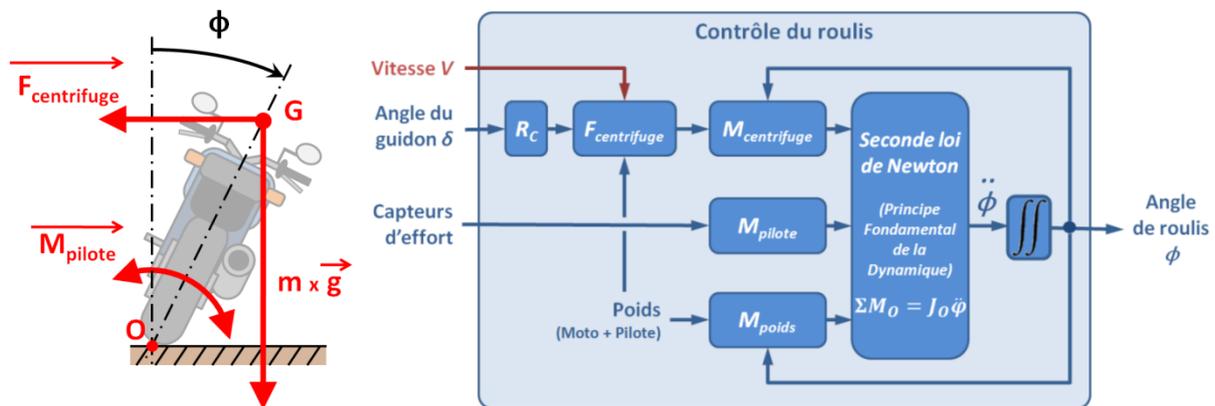


Figure 18 – Illustration du contrôle en roulis de la moto dans le cas de la stratégie « physique ».

Comme dans la stratégie basique, le rayon de courbure  $R_C$  de la trajectoire suivie par la moto est calculé à partir de l'empattement  $p$  de la moto et de l'angle guidon  $\delta$ . L'amplitude de la force centrifuge en est alors déduite en fonction de ce rayon de courbure, de la vitesse  $V$  de la moto et du poids de l'ensemble moto + conducteur. Le moment de rotation  $M_{centrifuge}$  induit par la force centrifuge est alors calculé en fonction de la distance entre le point de contact avec le sol et le centre de gravité (distance  $OG$ ) et l'inclinaison  $\Phi$  de la moto. De la même manière, on calcule le moment de rotation  $M_{poids}$  induit par le poids de l'ensemble moto + conducteur. Et enfin, le troisième moment de rotation  $M_{conducteur}$  induit par le pilote est déterminé directement à partir des valeurs renvoyées par les capteurs d'effort : il est proportionnel à la différence entre les valeurs des 2 capteurs.

L'accélération angulaire  $\ddot{\phi}$  est alors calculée grâce au Principe Fondamental de la Dynamique (ou Seconde Loi de Newton) qui donne pour l'ensemble moto + conducteur :

$$\sum M_O = J_O \cdot \ddot{\phi}$$

$\sum M_O$  est la somme des moments des forces extérieures ramenés autour de  $O$ , et  $J_O$  est le moment d'inertie de l'ensemble moto + conducteur autour de  $O$ .

Théoriquement, le motard est capable avec cette stratégie de piloter la moto virtuelle :

- soit avec son corps en modifiant  $M_{conducteur}$  ;
- soit avec le guidon : en influant sur le rayon de courbure, la force centrifuge est alors modifiée, de même que  $M_{centrifuge}$  ;
- soit avec l'accélérateur et/ou le frein : en changeant la vitesse, la force centrifuge (et donc  $M_{centrifuge}$ ) est modifiée.

Dans cette stratégie, l'angle  $\delta_o$  permettant de piloter le retour d'effort au guidon est calculé de la même façon que dans la stratégie fonctionnelle :

$$\delta_o = \frac{K_3}{V} \cdot \phi$$

#### 5.1.4. Protocole expérimental initial

##### 5.1.4.1. Eligibilité des sujets

Les participants devaient avoir une vue normale ou corrigée, ne pas présenter de troubles de l'équilibre ou du toucher, être âgés d'au moins 20 ans et au plus 50 ans, posséder le permis moto (A) et parcourir au moins 4000 km/an (en 2RM). Chaque sujet était indemnisé 50 €. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique de l'IFSTTAR.

##### 5.1.4.2. Dispositif expérimental

L'expérience a été réalisée avec le simulateur moto tel que décrit précédemment. L'environnement virtuel était projeté (projecteur Projection-design F-22) sur un écran blanc. La taille de l'image (l: 1.85 m, h: 1.24 m) générait, pour les participants en position de conduite sur le simulateur à une distance de 1.65 m de l'écran, un angle visuel de 60 degrés en largeur et de 40 degrés en hauteur. Les images (fréquence de rafraîchissement: 30Hz) étaient calculées et projetées à hauteur des yeux des participants.

##### 5.1.4.3. Plan expérimental et tâches

Chaque sujet devait effectuer 3 sessions de conduite, chacune dans une configuration différente, correspondant à la stratégie de commande employée. L'ordre des 3 configurations a été contrebalancé.

Pour chaque configuration, le sujet devait réaliser 4 tâches de conduite différentes, également présentées de façon contrebalancée :

- tâche de slalom :

Le motard avait 300 mètres pour démarrer, se rapprocher et longer une ligne de plots serrés de 50 mètres. Ensuite venait le slalom proprement dit, composé de 7 virages, marqués par des plots espacés de 20 mètres (Figure 19). Le motard avait ensuite 50 mètres pour s'arrêter. L'espacement des plots faisait qu'en condition réelle, le slalom serait considéré comme

« facile » : pour comparaison l'espacement des plots pour l'épreuve de slalom du permis varie entre 8 et 12 mètres.

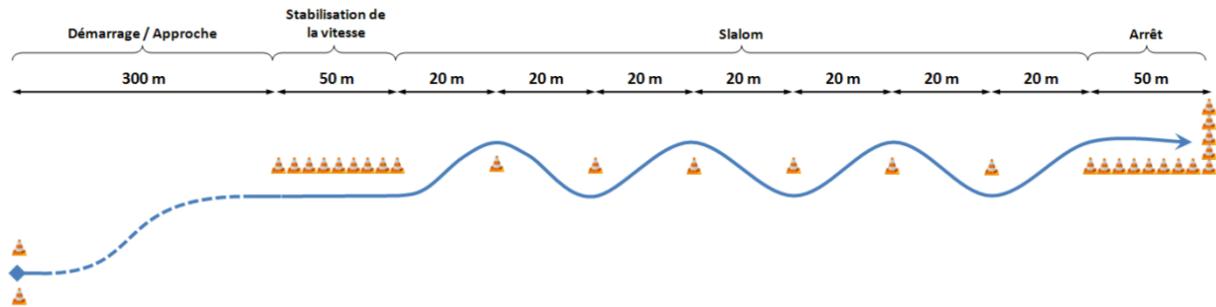


Figure 19 – Configuration de la tâche de slalom.

La vitesse de réalisation du slalom n'était pas imposée. Cependant il était rappelé au motard que ce n'était pas une épreuve de vitesse et que la consigne prioritaire était de réussir à effectuer le slalom. Le motard avait donc libre choix de la vitesse lui permettant de réaliser le slalom. L'hypothèse sous-jacente à cette liberté (dans le choix de la vitesse) était que plus la stratégie de commande permettait un contrôle naturel et « facile » du simulateur, et plus le motard adopterait une vitesse élevée. La vitesse de réalisation pouvait ainsi être utilisée en tant que variable objective de la « facilité » de prise en main du simulateur.

Les participants devaient répéter 13 fois le slalom, les 3 premières étant pour découvrir le parcours et s'y familiariser. Seules les 10 dernières ont été conservées pour l'analyse des résultats. Les participants avaient à leur disposition un bouton situé sur le guidon du simulateur lui permettant de se téléporter au début du parcours, afin de pouvoir enchaîner plus facilement les 10 réalisations du slalom.

- tâche d'évitement :

Le motard avait 300 mètres pour approcher un couloir de plots de 2 mètres de large et de 100 mètres de long (Figure 20). A l'issue de ce couloir, le motard devait éviter un mur de plots situé à 8 mètres de la fin du couloir. Après avoir fait son évitement, le motard devait « redresser » sa trajectoire et sortir dans un couloir de 3 mètres de large et situé 10 mètres après le mur.

Sur l'ensemble de la tâche, les participants devaient effectuer 13 évitements, les 3 premiers étant pour se familiariser avec le parcours et la tâche. Sur les 10 derniers évitements (qui sont conservés pour l'analyse des résultats), 5 étaient effectués par la gauche et 5 par la droite. L'ordre était aléatoire et la direction de l'évitement était renseignée par l'apparition d'un signal sur l'écran 15 mètres avant la fin du couloir. Comme pour la tâche de slalom, les participants devaient se téléporter en début de parcours et avant d'effectuer l'essai suivant.



mètres et de tronçons de courbe de rayon de courbure 150 ou 300 mètres. Les virages sont alternativement à gauche et à droite. La longueur totale du circuit est d'environ 6.2 km.

Le motard avait pour consigne de respecter une vitesse maximale de 90 km/h, comme sur une route de campagne réelle. Sur les 6 minutes de conduite, seules les 4 dernières étaient conservées pour l'analyse des données.

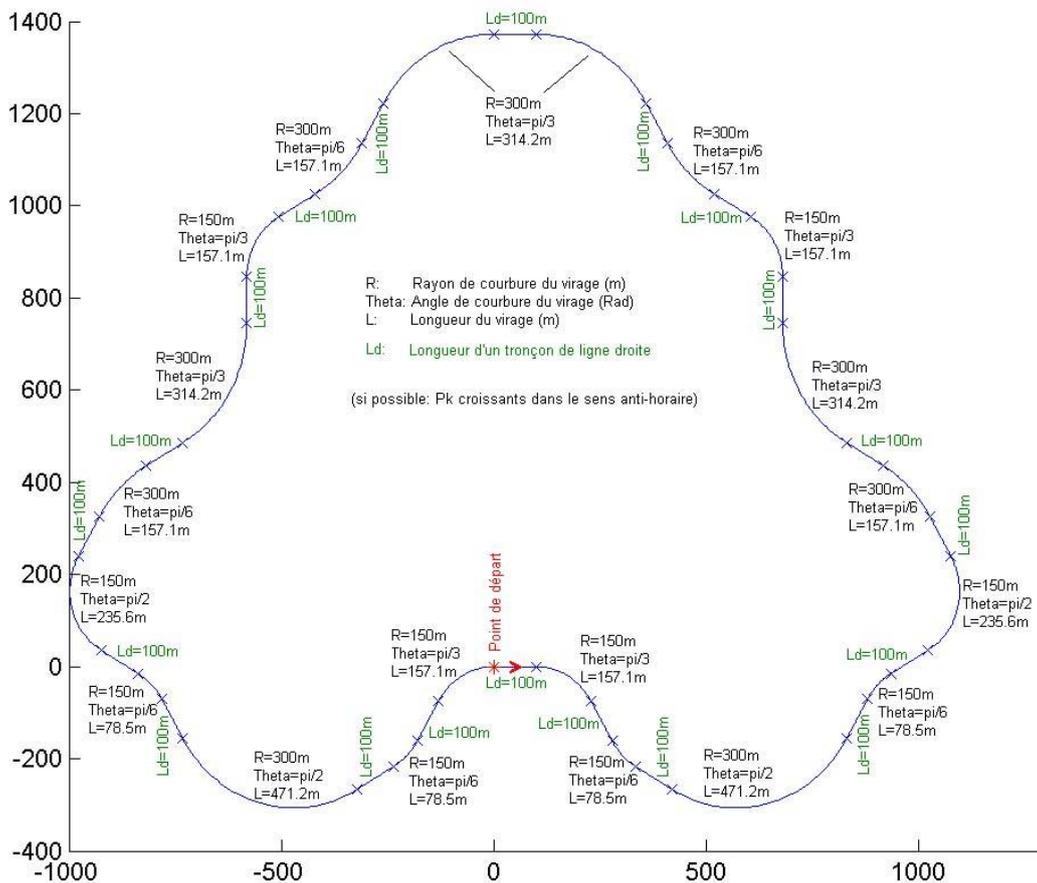


Figure 22 – Schéma de la route utilisée, composée de tronçons de ligne droite de 100 mètres et de courbes à gauche ou à droite de rayon de courbure 150 ou 300 mètres.

#### 5.1.4.4. Organisation générale

La Figure 23 présente le déroulement général de l'expérimentation. Après avoir été accueilli, l'expérimentation était présentée aux sujets : but, déroulement, procédure. Ils remplissaient alors la fiche d'informations avant de débiter l'expérimentation à proprement parler.

Pour chaque configuration, les sujets ont rempli un questionnaire de cybermalaise (Simulator Sickness Questionnaire – SSQ- de Kennedy, Lane, Berbaum & Lilienthal, 1993), avant de s'installer sur le simulateur et après avoir effectué les 4 tâches de conduite. Après le questionnaire de cybermalaise post-conduite, les sujets ont également rempli 2 questionnaires de ressenti (questionnaire de présence de Witmer & Singer, 1998, et questionnaire sur le réalisme et la contrôlabilité du simulateur – voir, respectivement annexes 1 et 2) afin de recueillir des données subjectives de leur expérience de conduite sur simulateur dans chaque configuration.

A la toute fin de l'expérimentation, il était également demandé aux sujets de classer les 3 configurations par ordre de préférence en fonction de certains critères.

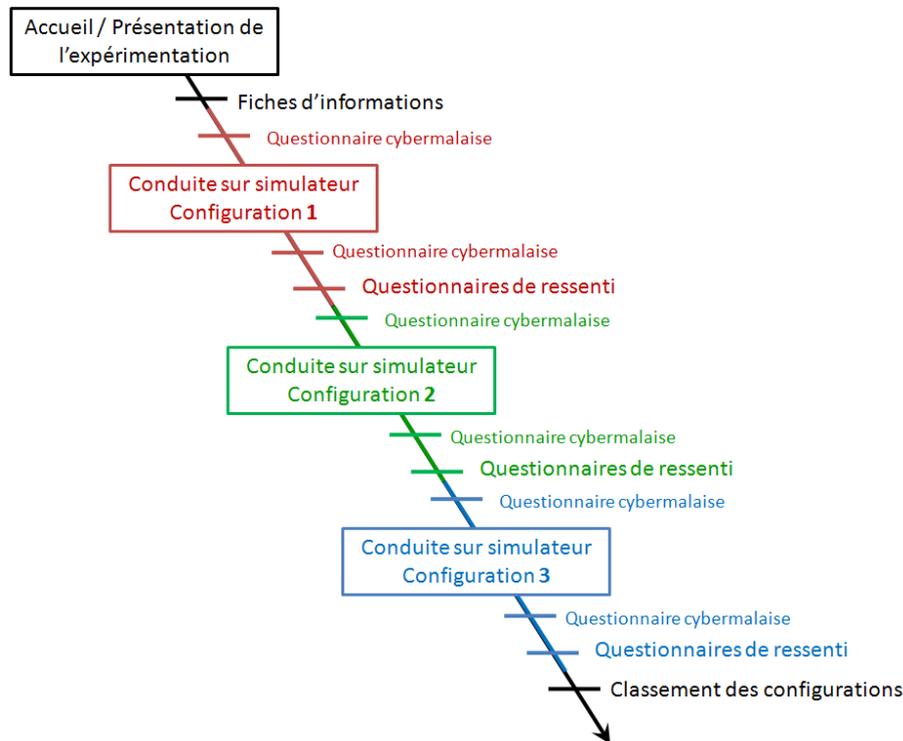


Figure 23 – Déroulement général de l'expérimentation.

### 5.1.5. Evolutions du protocole expérimental

Avant de procéder à l'expérimentation finale, des pré-tests ont été réalisées avec 8 personnes. Sur ces 8 personnes, aucune n'a été en mesure de faire correctement l'ensemble des tâches de conduite avec la stratégie « physique ». Certaines personnes ont préféré arrêter avant la fin de la session de conduite, elles ont toutes exprimé une grande gêne après la conduite, une de ces personnes ayant même été jusqu'au vomissement. Il a donc été décidé de retirer cette stratégie du protocole. Le protocole finalement utilisé est présenté en Figure 24.

Vingt-sept personnes au total ont été recrutées pour l'expérimentation finale : 22 hommes et 5 femmes. Sur ces 27 participants, seulement 23 ont été retenus. Quatre personnes ont en effet abandonné suite à la survenue de mal sévère du simulateur. La moyenne d'âge des participants était de 30,6 ans, le plus jeune ayant 21 ans et le plus âgé 49 ans. Ils roulaient tous en moyenne 11 000 km/an en 2RM (4 000 km/an minimum jusqu'à 25 000 km/an maximum).

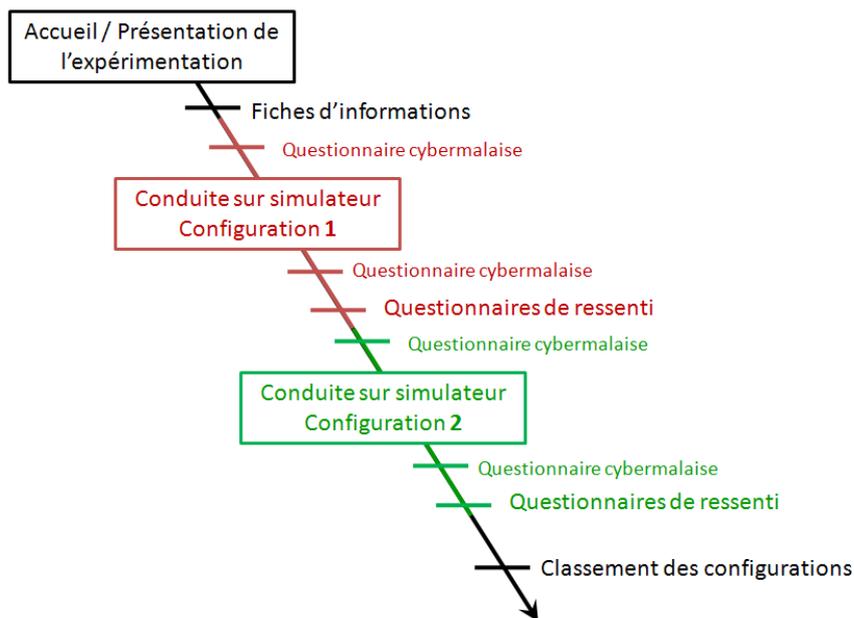


Figure 24 – Protocole final de l'expérimentation.

### 5.1.6. Résultats & Discussion

Les présents résultats rassemblent les données recueillies par questionnaire. Les données comportementales ont également été enregistrées pendant les différentes sessions de conduite mais leur analyse n'a pas encore été réalisée.

#### 5.1.6.1. Mal du simulateur

L'échelle de mesure classique de mal du simulateur, élaborée par l'équipe de Kennedy en 1993, liste exactement 16 symptômes : malaise général, fatigue, mal de tête, fatigue oculaire, difficulté d'accommodation, hyper salivation, suée, nausée, difficulté de concentration, sensation de tête lourde, vision floue, étourdissement yeux ouverts, étourdissement yeux fermés, vertige, réveil de la zone gastrique et éructation. Ces symptômes sont évalués selon la même échelle de sévérité en 4 points (Rien A Signaler – léger – modéré – sévère).

Trois sous-échelles ont été identifiées : Nausée, malaise Oculomoteur, et Désorientation. Ces sous-échelles regroupant plusieurs symptômes fournissent un diagnostic potentiel en interprétant quels aspects d'une simulation peuvent provoquer la symptomatologie spécifique du mal. De plus, un score total de sévérité, combine les résultats de ces sous-échelles pour donner une estimation du niveau global du malaise. Les sujets remplissent ce questionnaire avant et après chaque session expérimentale, afin d'établir une ligne de base pouvant être comparée aux résultats du questionnaire post-session expérimentale. Plus le score est élevé et plus le malaise est important. Le Tableau 3 présente ces résultats.

Le questionnaire étant administré avant et après chaque session expérimentale, la première opération à faire est donc de soustraire le score obtenu avant la passation à celui obtenu après, afin d'obtenir la réelle influence de la session simulée. Les scores pour chaque participant sont ensuite calculés selon le mode de codage initial développé par Kennedy et al. (1993),

permettant d'établir les scores aux 3 sous-échelles. La sévérité des symptômes de chacune des sous-échelles est pondérée par un facteur de 1 ou de 0 selon la présence ou non du symptôme, et les sous-échelles peuvent être combinées pour calculer un score total de SSQ (Tableau 3).

**Tableau 3 : Cotation du SSQ (Kennedy, et al., 1993).**

Symptômes du SSQ	Poids		
	Nausée	Oculomotrice	Désorientation
Malaise général	1	1	0
Fatigue	0	1	0
Mal de tête	0	1	0
Fatigue oculaire	0	1	0
Difficulté d'accommodation	0	1	1
Hyper salivation	1	0	0
Sueur	1	0	0
Nausée / vomissement	1	0	1
Difficulté de concentration	1	1	0
"Tête Lourde"	0	0	1
Vision floue	0	1	1
Étourdissement Yeux Ouverts	0	0	1
Étourdissement Yeux Fermés	0	0	1
Vertige	0	0	1
Réveil de la zone gastrique	1	0	0
Éructation	1	0	0
TOTAL	(1)	(2)	(3)

*Scores*  
 $N = (1) \times 9,54$   
 $O = (2) \times 7,58$   
 $D = (3) \times 13,92$   
 $SSQ \text{ Total} = ((1) + (2) + (3)) \times 3,74$

Les Figures 25, 26 et 27 présentent les scores par sujet et par sous-échelle. La figure 28 et le tableau 4 présentent le score total au SSQ. On peut voir que de façon quasi-systématique, le score avec la stratégie fonctionnelle est supérieur à celui obtenu avec la stratégie basique.

D'un point de vue descriptif, nous pouvons remarquer que le score total tout comme les scores finaux obtenus aux différentes sous-échelles sont relativement élevés. Les résultats font ressortir que les sujets déclarent plus de symptômes après qu'avant la session simulée, ce qui nous permet d'affirmer que les sujets ont été sensible au mal du simulateur, et tout particulièrement pour la stratégie de commande fonctionnelle. Il faut toutefois préciser que le score total obtenu pour la stratégie basique n'est pas anecdotique et que l'on doit pouvoir dire que les participants ont également ressenti certains symptômes avec cette stratégie.

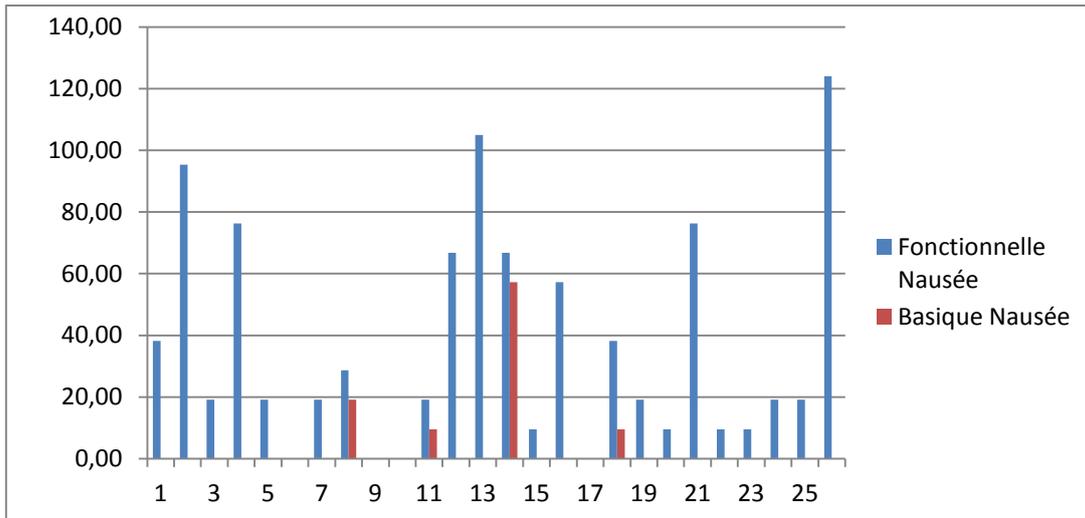


Figure 25 – Scores au SSQ par sujet pour la sous-échelle « nausée ».

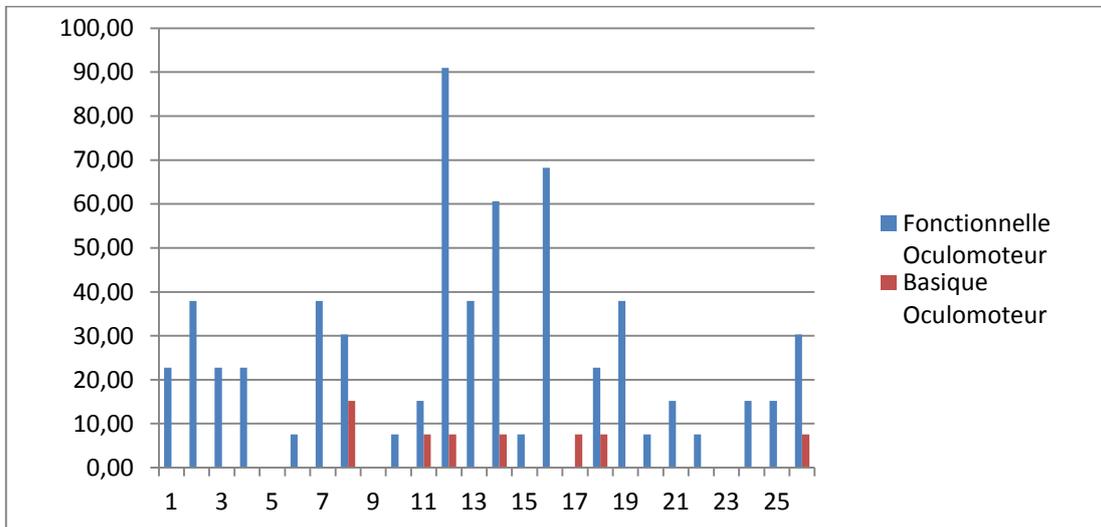


Figure 26 - Scores au SSQ par sujet pour la sous-échelle « oculomoteur ».

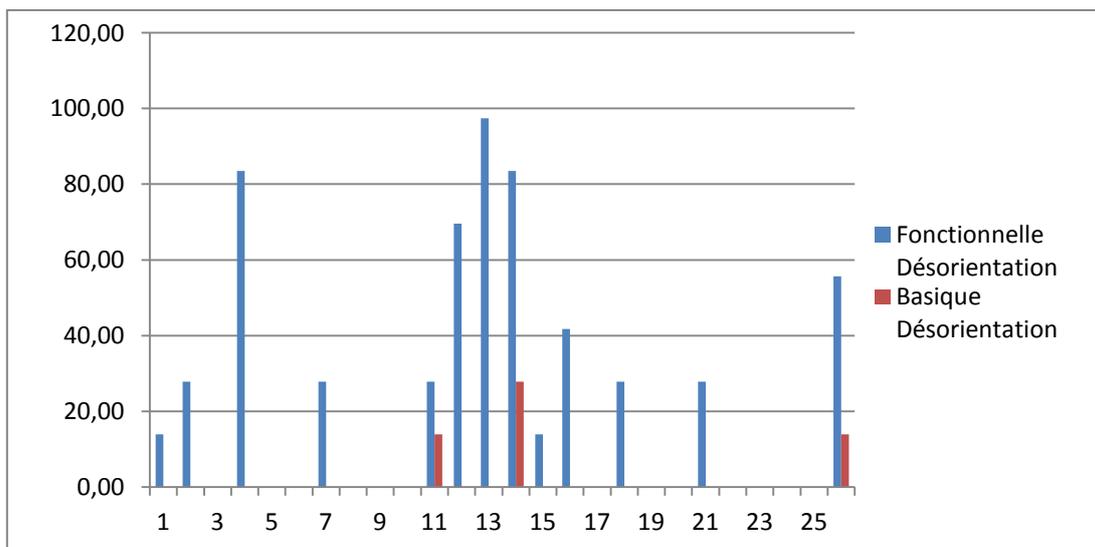


Figure 27 - Scores au SSQ par sujet pour la sous-échelle « désorientation ».

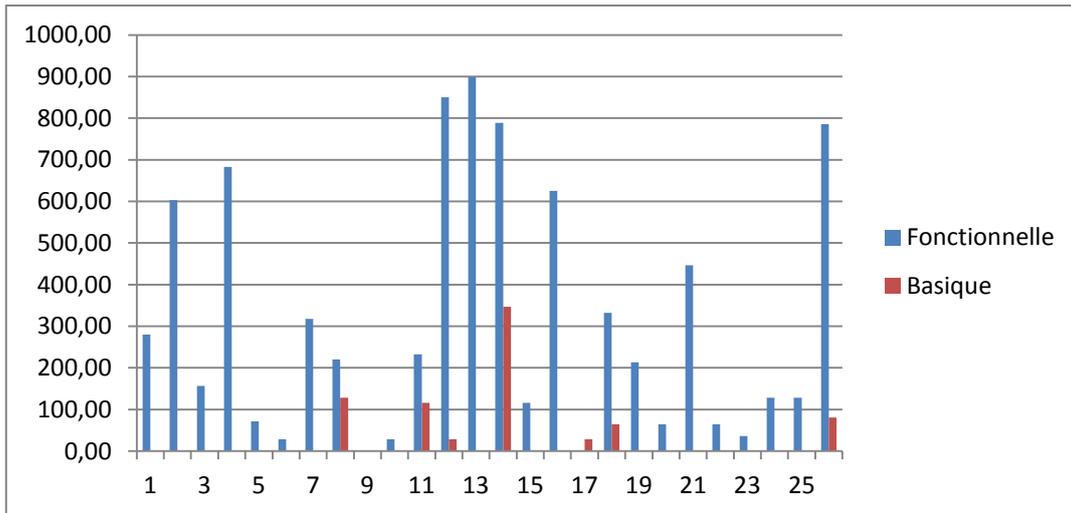


Figure 28 - Score total au SSQ par sujet en fonction de la stratégie de commande.

Tableau 4 – Scores moyens au SSQ en fonction de la sous-échelle et de la stratégie de commande.

	Stratégie fonctionnelle	Stratégie Basique
Sous-échelle « nausée »	36,33	3,67
Sous-échelle « oculomoteur »	23,91	2,33
Sous-échelle « désorientation »	23,02	2,14
Score total	311,37	30,46

Le mal du simulateur étant mis en évidence, les résultats peuvent être affinés en s'intéressant aux scores finaux obtenus aux 3 sous-échelles du SSQ (Nausée, Oculomotrice et de Désorientation). Il apparaît que les sujets déclarent plus de symptômes de *Nausée* ou liés à la *Désorientation* que de symptômes *Oculomoteurs*. Il est intéressant de noter que la prédominance de symptômes nauséux et liés à la désorientation, renvoie davantage au mal des transports classique (ressentis par les passagers) qu'aux cybermalaises, généralement caractérisés par des symptômes oculomoteurs. Ce qui nous laisse suggérer, selon la théorie des attentes, que le principal conflit à l'origine des symptômes se situe à un niveau visuo-vestibulaire. Si l'absence de mouvement pour la stratégie basique pourrait expliquer les résultats obtenus, il convient alors de rechercher, pour la stratégie fonctionnelle, un conflit dans les modalités de restitution du mouvement ou dans la capacité des conducteurs à contrôler le simulateur.

#### 5.1.6.2. Sentiment de présence

Le Tableau 5 présente les résultats au questionnaire de présence (un score global et un score par sous-échelle). Le questionnaire est annexé au document (annexe 1) et les différents items sont rassemblés par sous-échelle.

L'échelle « Réalisme » a trait au caractère naturel de l'expérience vécue au sein de l'environnement, les items faisant systématiquement référence à la situation réelle. L'échelle

« Possibilité d’agir » a trait aux possibilité d’action de l’opérateur au sein de l’EV et à sa capacité à contrôler les événements. L’échelle « Qualité de l’interface » repose sur le degré d’interférence du dispositif d’interaction avec la tâche à effectuer. L’échelle « Possibilité d’examiner » a trait au niveau de détail avec lequel l’utilisateur peut inspecter la scène. Les échelles « Auto-évaluation » et « Aspects auditifs » concernent respectivement l’évaluation de sa performance par l’utilisateur et la qualité de la restitution sonore.

Le Tableau 5 montre que sur les deux dimensions qui touchent à l’interaction avec le dispositif (« Possibilité d’agir » et « Qualité de l’interface »), les scores sont plus élevés pour la stratégie basique que pour la stratégie fonctionnelle. Corrélé à ces résultats, les participants ont mieux évalué leur performance de conduite avec la stratégie basique.

Le Tableau 5 met en évidence des scores sensiblement équivalents entre les deux stratégies pour les échelles « Réalisme », « Possibilité d’examiner » et « Aspect auditif ». Si pour ces deux dernières, ce résultat n’est pas étonnant, les caractéristiques de l’image et le retour d’information sonore étant identiques entre les deux stratégies, les scores pour l’échelle « Réalisme » ne vont pas dans le sens des évaluations fournies par les participants en post-session sur la dimension « réalisme » du questionnaire développé par nos soins. Ce résultat pourrait s’expliquer par le caractère générique du questionnaire de présence, les items de l’échelle « Réalisme » abordant l’expérience globale vécue dans l’environnement virtuel sans orienter spécifiquement vers des caractéristiques de l’interaction.

**Tableau 5 – Scores au questionnaire de présence en fonction de la stratégie de commande.**

Echelles (score max.)	Stratégie fonctionnelle		Stratégie Basique	
	Moyenne	%	Moyenne	%
Réalisme (49)	30,25	61,73	30	61,22
Possibilité d’agir (28)	17,96	64,14	22,25	79,46
Qualité interface (21)	13,92	66,29	16,04	76,38
Possibilité d’examiner (21)	12,29	58,52	13,63	64,90
Auto-évaluation performance (14)	8,71	62,21	12,46	89,00
Aspect auditif (21)	13,33	63,48	14,13	67,29
Score global	96,46	62,64	108,5	70,45

Certains auteurs ont proposé qu’un score de présence de 80% était acceptable dans un simulateur de conduite (e.g., Tichon, 2007 ; Walsche, Lewis, O’Sullivan & Kim, 2005). Si pour certaines échelles, les scores dépassent effectivement 80% du score maximum pour la stratégie basique, le score total reste en deçà de ce seuil acceptable. Les scores obtenus pour la stratégie fonctionnelle montrent quant à eux que les caractéristiques immersives et interactives de cette version du simulateur deux-roues ne sont pas satisfaisantes.

### 5.1.6.3. *Réalisme/contrôlabilité*

Le Tableau 6 présente les résultats des questionnaires de réalisme/contrôlabilité. Plus le score est élevé (sur une échelle allant de 1 à 7), plus le réalisme ou la contrôlabilité sont bons. Les résultats montrent clairement que la stratégie fonctionnelle est associée à un meilleur réalisme alors que la stratégie basique permet d’avoir une meilleure contrôlabilité.

**Tableau 6 – Résultats des questionnaires de Réalisme/Contrôlabilité.**

	Stratégie fonctionnelle	Stratégie Basique
Réalisme – vitesse	4,2	4,2
Réalisme – accélération/freinage	3,9	3,6
Réalisme – virage	4,4	3,7
<b>Réalisme – MOYENNE</b>	<b>4,2</b>	<b>3,7</b>
Contrôlabilité – évitement	4,2	5,3
Contrôlabilité – slalom	4,5	5,4
Contrôlabilité – ville	4,5	5,1
Contrôlabilité – campagne	5,1	5,8
<b>Contrôlabilité – MOYENNE</b>	<b>4,6</b>	<b>5,4</b>

### 5.1.6.4. *Classement des configurations*

Le Tableau 7 présente le classement des deux configurations effectué par les participants à la fin de l’expérimentation. Le chiffre indique le nombre de sujets ayant choisi la configuration en fonction de la tâche (évitement, slalom, conduite en ville, conduite sur route) ou de la dimension proposée (réalisme par rapport à une moto réelle, facilité à conduire, préférence personnelle).

Même si la stratégie « basique » est celle permettant le plus facilement de conduire le simulateur, ce n’est pas celle qui apporte le plus de réalisme par rapport à une moto réelle. Une majorité de sujets préfère la stratégie « fonctionnelle » de façon générale, même si la stratégie basique est préférée pour la conduite en ville et la tâche d’évitement.

Alors que cette expérimentation avait pour objectif de mener une première évaluation du simulateur moto de l’IFSTTAR avec des conducteurs « tout venant » (et donc autres que des conducteurs experts ou que les membres du laboratoire), il apparaît de ces résultats que la stratégie de commande dite « physique » n’est pas une voie à suivre, au vu du nombre de participants rendus malades par la conduite sur le simulateur. De plus, les limites physiques inhérentes aux plate-formes (absence de force centrifuge) proscrivent l’application directe d’un modèle mécanique de moto. Les données issues du SSQ montrent également que la

**Tableau 7 – Préférence des sujets en fin d'expérimentation.**

	<b>Stratégie fonctionnelle</b>	<b>Stratégie Basique</b>
Tâche d'évitement	<b>10</b>	<b>13</b>
Slalom	<b>13</b>	<b>10</b>
Conduite en ville	<b>8</b>	<b>15</b>
Conduite sur route	<b>17</b>	<b>6</b>
Cas général :		
- Réalisme par rapport à une moto réelle	<b>19</b>	<b>4</b>
- Facilité à conduire	<b>2</b>	<b>21</b>
- Préférence personnelle	<b>16</b>	<b>7</b>

stratégie fonctionnelle provoque elle aussi des cinétoses, mais les évaluations « plutôt » positives fournies par les participants suggèrent que cette stratégie doit être affinée. La stratégie basique étant utilisée à des fins de comparaison, elle sert donc essentiellement à positionner une stratégie de commande utilisant la plate-forme dynamique et reposant sur un mode de conduite en contre-braquage. Sur la base de ces premiers résultats, nous avons donc cherché à faire évoluer la stratégie de commande fonctionnelle en nous attachant à améliorer la conduite à basse vitesse où l'application du contrebraquage pur n'est pas satisfaisante.

## **5.2. Evolution de la stratégie fonctionnelle**

Contributeurs : Stéphane Caro, Fabrice Vienne.

### **5.2.1. Problématique**

Les simulateurs de conduite moto utilisés dans le domaine de la recherche utilisent généralement des techniques de conduite à un seul degré de liberté. Le conducteur doit contrôler sa trajectoire et le simulateur s'incline automatiquement en fonction de la courbure de la trajectoire et de la vitesse. Les techniques de conduite utilisées par ces simulateurs sont dites de type « braquage » lorsqu'il faut tourner le guidon du côté où l'on souhaite aller. C'est le cas, pour rappel du Honda Riding Trainer ou du simulateur de l'Université de Nottingham (voir Crundall et al., 2012, 2013 ; Stedmon et al., 2011). Cette technique qui mime la conduite d'une voiture permet une prise en main rapide du simulateur de conduite. Au contraire, la technique est dite de type « contre-braquage » lorsqu'il faut pousser sur le guidon du côté où l'on souhaite aller. Cette seconde technique, plus proche de la conduite d'une moto à vitesse établie est cependant plus difficile à adopter sur simulateur. A notre connaissance, aucun de ces simulateurs ne permet un changement progressif de la technique de conduite en fonction de la vitesse.

La société ECA-FAROS produit et commercialise des simulateurs de deux roues motorisés. Le modèle haut de gamme commercialisé par cet industriel impose l'une ou l'autre des techniques de conduite selon la vitesse à laquelle roule le conducteur : « braquage » en dessous d'une certaine vitesse et « contre-braquage » au-dessus de cette vitesse. Le changement se fait instantanément et est annoncé au conducteur par un bip sonore. Un simulateur a été développé au Japon (Miyamaru, Yamasaki, & Aoki, 2002 ; Yamasaki, Mitsuru, & Miyamaru, 1996), dont la méthode de calcul - dite "fonctionnelle" - ne se fonde pas sur un modèle mécanique de moto mais sur un ensemble de fonctions relativement simples décrites par des experts. La méthode de calcul mise au point présente plusieurs avantages : (1) le calcul du roulis se fonde à la fois sur les actions du conducteur au guidon et ses actions sur la plateforme, et (2) les paramètres ajustés dépendent de la vitesse. Leur méthode de calcul présente néanmoins plusieurs limites majeures : (1) le retour d'effort produit dans le guidon est pauvre puisqu'il crée simplement une force de réaction proportionnelle à l'action du conducteur. Pourtant, les efforts dans le guidon constituent un élément majeur de la conduite moto. (2) L'angle guidon n'est pas utilisé dans la méthode de calcul alors qu'en situation réelle, c'est bien l'angle guidon qui dicte la trajectoire de la moto lorsque celle-ci roule à basse vitesse.

### 5.2.2. Nouvelle méthode de calcul

Une méthode de calcul des composantes latérales (roulis et lacet) et du retour d'effort guidon a été obtenue à partir d'une liste de contraintes fonctionnelles et qui ne se compose que de calculs simples. Le roulis se calcule par intégration des signaux issus du guidon et de capteurs d'effort (mesure du couple de renversement produit par le conducteur). La trajectoire se calcule à partir du roulis et de l'angle guidon. Enfin, le retour d'effort guidon se fonde sur les deux signaux précédents et leurs dérivées.

Cette méthode permet de passer progressivement d'une technique de conduite à deux degrés de liberté à basse vitesse (qui sont la trajectoire et l'équilibre) à une technique de conduite à un seul degré de liberté à haute vitesse (trajectoire et équilibre confondues). De plus, le retour d'effort guidon permet au conducteur de retrouver des sensations kinesthésiques similaires à celles qu'il ressent sur sa moto et permet par ailleurs de redresser le simulateur en sortie de virage et de le stabiliser.

La méthode de calcul proposée permet de conduire le simulateur moto avec des techniques de conduite proches de celles utilisées en situation réelle, tout en permettant une prise en main du simulateur relativement facile. Plus précisément, le conducteur doit gérer à la fois l'équilibre et la trajectoire à basse vitesse, la moto se dirigeant du côté où est tourné le guidon. Au contraire, à haute vitesse, le conducteur doit seulement contrôler sa trajectoire en utilisant la technique du contre-braquage. De plus, le retour d'effort guidon fournit des informations utiles au conducteur et participe à la stabilisation du simulateur.

Elle nécessite trois entrées :

- la vitesse à laquelle roule le conducteur ;
- une mesure du couple mécanique exercé par le conducteur sur la plateforme du simulateur : le couple de renversement. Il s'agit de mesurer les efforts produits par le

conducteur lorsqu'il penche son corps ou lorsqu'il appuie sur le réservoir ou les repose-pieds. Cette mesure est obtenue simplement à partir des capteurs d'effort sur le simulateur ;

- une mesure de l'angle guidon.

Trois sorties sont calculées :

- l'angle de roulis de la moto est utilisé pour incliner la plateforme ainsi que le rendu visuel ;
- la vitesse de lacet. Cette grandeur permet de calculer la trajectoire du véhicule simulé ;
- le couple à exercer par le dispositif de retour d'effort guidon.

Comme indiqué sur la Figure 29, la méthode de calcul se compose de quatre sous-ensembles représentés par des cadres verts. Trois de ces sous-ensembles permettent le calcul des grandeurs citées ci-dessus (angle de roulis, vitesse de lacet et couple du retour d'effort guidon). Le dernier sous-ensemble permet de répartir leur rendu entre les mouvements de la plateforme et l'affichage visuel. La modalité de restitution des grandeurs calculées doit en effet être contrôlée puisqu'il s'agit de fournir au conducteur des informations sensorielles adéquates.

Le calcul proposé se compose de blocs élémentaires : sommateurs, intégrateur, dérivateurs, filtre passe-bas, et fonctions mathématiques. Les fonctions sont représentées par des blocs rectangulaires. Elles permettent de calculer la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée et de la vitesse (vitesse à laquelle roule la moto simulée). Certaines de ces fonctions sont de simples gains alors que d'autres peuvent être non linéaires ou discontinues.

### **5.3. Etude 2 : Effets du modèle de véhicule sur les performances de conduite, le sentiment de présence et le mal du simulateur**

Contributeurs : Amit Shahar, Régis Lobjois, Stéphane Caro.

#### **5.3.1. Problématique**

L'analyse des causes d'accident en conduite moto suggère que le fort risque auquel sont exposés les conducteurs de deux-roues est renforcé par certains défauts dans les habiletés de conduite (e.g., Clarke, Ward, Bartle & Truman, 2007; Hurt, Ouellet & Thom, 1981; Mannering & Grodsky, 1995). Pour Hurt et al. (1981), la formation et l'entraînement sont susceptibles de réduire l'accidentalité des deux-roues motorisés. Dans cette perspective, les simulateurs de conduite constituent des outils pertinents puisqu'ils permettent d'exposer les conducteurs à des situations dangereuses sans risque direct. Ils peuvent également être utilisés à des fins de recherche. Ils sont d'ailleurs devenus ces dernières années des outils privilégiés pour investiguer les comportements des conducteurs de deux-roues et les processus sous-jacents à la conduite moto (e.g., Crundall et al., 2012; Crundall et al., 2013; Di Stasi et al., 2011; Hosking et al., 2010; Liu et al., 2009; Shahar et al., 2010). Bien que l'emploi de

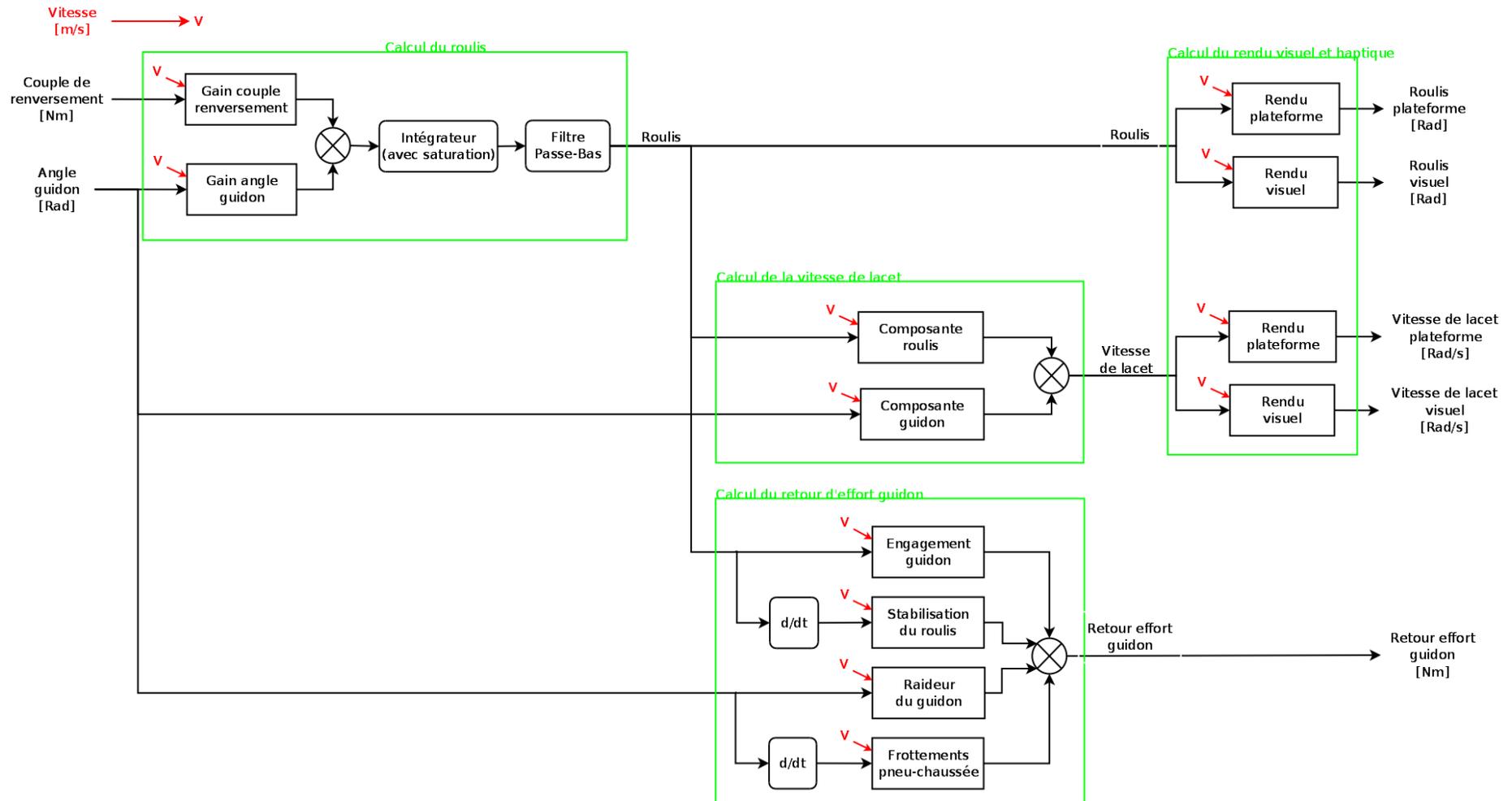


Figure 29 - Représentation de la méthode de calcul. Elle est composée de quatre sous-ensembles représentés par des cadres verts. Trois de ces sous-ensembles permettent respectivement le calcul du roulis, du lacet, et du retour d'effort guidon. Le dernier permet de répartir leur rendu entre les mouvements de la plateforme et l'affichage visuel. Parmi les blocs élémentaires, les blocs rectangulaires représentent des fonctions qui dépendent de la vitesse à laquelle roule la moto.

simulateurs à des fins de recherche présente de nombreux avantages et en particulier l'alternative à des études sur route ouverte, la validation n'en reste pas moins indispensable avant que des conclusions applicables à la situation réelle soient formulées.

Cependant, force est de constater qu'il existe de substantielles différences entre les simulateurs utilisés actuellement à des fins de recherche, ainsi qu'entre ces simulateurs et la conduite réelle. Le simulateur Honda Riding Trainer, qui est le simulateur le plus fréquemment utilisé pour la recherche (e.g., Di Stasi et al., 2009; Hosking et al., 2010; Shahar et al., 2010) est un simulateur dit statique. Ce même simulateur, tout comme ceux disposant d'une plate-forme mobile, diffère de plus de la conduite en réelle du fait de la technique de braquage couramment implémentée. L'emploi de tels simulateurs pose donc la question de la validité des résultats obtenus lorsque l'objectif est d'étudier les comportements des conducteurs, en particulier la prise de virage (e.g., Crundall et al., 2012, 2013).

L'objectif de cette étude était donc de comparer différentes configurations de conduite du simulateur moto et leurs effets sur les comportements lors de la prise de virage. Nous avons comparé :

- une configuration dite Contre-Braquage (CB), reposant sur la stratégie de commande fonctionnelle développée dans le laboratoire : conduite en contre-braquage, restitution visuelle et inertielle de l'inclinaison, prise en compte des mouvements du conducteur sur la moto grâce aux capteurs d'effort,
- une configuration avec un mode Braquage Avec Mouvement de la plate-forme (BAM),
- une dernière configuration inspirée du HRT et reposant sur un mode Braquage Sans Mouvement de la plateforme (BSM).

Afin de faciliter la comparaison entre ces trois configurations de conduite, nous avons choisi de construire les deux configurations "braquage" à partir de la configuration "contrebraquage". Nous avons ainsi modifié les paramètres nécessaires (tels que la prise en compte de l'angle guidon, notamment de son signe, et la force du retour d'effort guidon) et avons laissé les autres paramètres inchangés. Cette démarche doit nous permettre d'évaluer l'impact des paramètres manipulés sur la prise en main du simulateur.

### 5.3.2. Méthode

#### 5.3.2.1. Participants

Dix-huit motocyclistes volontaires (Age moyen = 30.61 ans, SD= 6.52; Nombre moyen d'années de permis moto = 6.31 ans, SD= 4.83) ont participé à cette étude. Ils ont été recrutés par petites annonces diffusées via différents canaux dont des forums de motocyclistes. Tous avaient une vision normale ou corrigée, ont signé un formulaire de consentement et ont perçu une indemnisation de 40 euros pour leur participation. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique de l'IFSTTAR.

#### 5.3.2.2. Dispositif expérimental

L'étude a été réalisée avec le simulateur de conduite moto de l'IFSTTAR. Comme dans l'expérience précédente, l'environnement virtuel était projeté (projecteur Projection-design F-22) sur un écran blanc. La taille de l'image (largeur: 1.85 m, hauteur: 1.24 m) générait, pour les participants en position de conduite sur le simulateur à une distance de 1.65 m de l'écran, un angle visuel de 60 degrés en largeur et de 40 degrés en hauteur. Les images (fréquence de rafraîchissement: 30Hz) étaient calculées et projetées à hauteur des yeux des participants.

La scène visuelle représentait une route sinueuse à deux voies sans trafic (voir la Figure 20 pour le tracé exact). Elle était composée de tronçons de route alternant entre des lignes droites de 100 mètres et des virages de rayon de courbure 150 ou 300 mètres (10 de chaque, pour un total de 20 virages). La longueur totale du circuit est d'environ 6.2 km.

### 5.3.2.3. *Tâche et procédure*

Les participants devaient effectuer 3 sessions de conduite, chacune correspondant à une des 3 configurations. Leur tâche consistait à se comporter sur la route de façon naturelle, ils avaient toute latitude dans la gestion de leur trajectoire, et devaient respecter une vitesse de consigne de 90 km/h.

A leur arrivée, le déroulement général de l'expérience était expliqué aux participants. Pour chaque configuration de conduite, les participants réalisaient deux tours de circuit pour se familiariser avant de procéder à la phase expérimentale proprement dite qui incluait deux tours supplémentaires. Les participants devaient en plus compléter le SSQ avant et après la session de conduite test, et le PQ uniquement après. L'ordre de passation des 3 configurations était contrebalancé. Une fois les 3 sessions de conduite effectuées, ils complétaient un questionnaire destiné à comparer les 3 configurations sur 4 dimensions (réalisme par rapport à une moto réelle, facilité de prise en main, facilité à conduire, préférence personnelle).

## 5.3.3. Résultats

### 5.3.3.1. *Mal du simulateur*

Tout d'abord, comme le montre le Tableau 8, les scores aux sous-échelles comme total illustrent des degrés de sévérité relativement faible, voire inexistant.

Nous avons, dans un premier temps, analysé l'effet de l'exposition (comparaison entre les mesures pré- et post-expérimentales des sous-échelles et du score total) pour chacune des configurations de conduite.

Pour la conduite avec le modèle braquage sans mouvement, le test  $t$  a mis en évidence une différence significative ( $t(17) = -2.27, p = .037$ ) entre le score pré- et post-expérimental uniquement pour la sous-échelle 'oculomoteur' (qui regroupe les items malaise général, fatigue, maux de tête, fatigue oculaire, difficulté d'accommodation, difficulté de concentration, vision floue), le score à cette sous-échelle augmentant après la session de conduite.

Pour la conduite en mode braquage avec mouvement de la plate-forme, le test  $t$  a mis en évidence une augmentation du score à l'échelle 'oculomoteur' après la session de conduite comparativement à avant ( $t(17) = -2.27, p < .05$ ). L'effet de la session de conduite sur le score global approchait le seuil de significativité ( $t(17) = -1.99, p = .06$ ).

Nous avons ensuite comparé l'effet de la session de conduite (différence entre les scores pré- et post-expérimentaux) en fonction de la configuration. L'ANOVA n'a révélé aucune différence significative, confirmant que les trois configurations ne se différençaient pas sur la question du mal du simulateur.

**Tableau 8 - Scores au SSQ (ET) en fonction de la sous-échelle, de la configuration de conduite et du moment (avant/après la session de conduite).**

	Braquage sans mouvement		Braquage avec mouvement		Contre-braquage	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Score total	7.06 (10.49)	8.31 (7.54)	4.99 (7.14)	9.97 (16.02)	4.36 (5.48)	9.97 (14.05)
Oculomoteur	10.53 (15.41)	11.37 (8.32)	6.74 (8.58)	11.37 (14.76)	7.16 (8.00)	11.37 (10.80)
Désorientation	4.64 (13.50)	4.64 (11.70)	4.64 (14.32)	7.73 (18.01)	3.09 (7.63)	8.51 (20.33)
Nausée	1.59 (3.66)	3.71 (7.42)	1.06 (3.09)	5.83 (13.94)	0.00 (0.00)	5.30 (13.97)

### 5.3.3.2. Questionnaire de présence

Les analyses de variance ont été réalisées sur les scores moyens ramenés sur une échelle en sept points de type Likert afin de comparer les scores aux sous-échelles entre eux. Les résultats n'ont pas montré de différences entre les configurations de conduite sur le score total au questionnaire ni sur les sous-échelles 'Qualité de l'Interface' et 'Aspects Auditifs'. Par contre, les effets sur les dimensions 'Réalisme', 'Possibilité d'Agir', 'Possibilité d'Examiner' et 'Auto-évaluation' étaient significativement différents entre les trois configurations (Tableau 9).

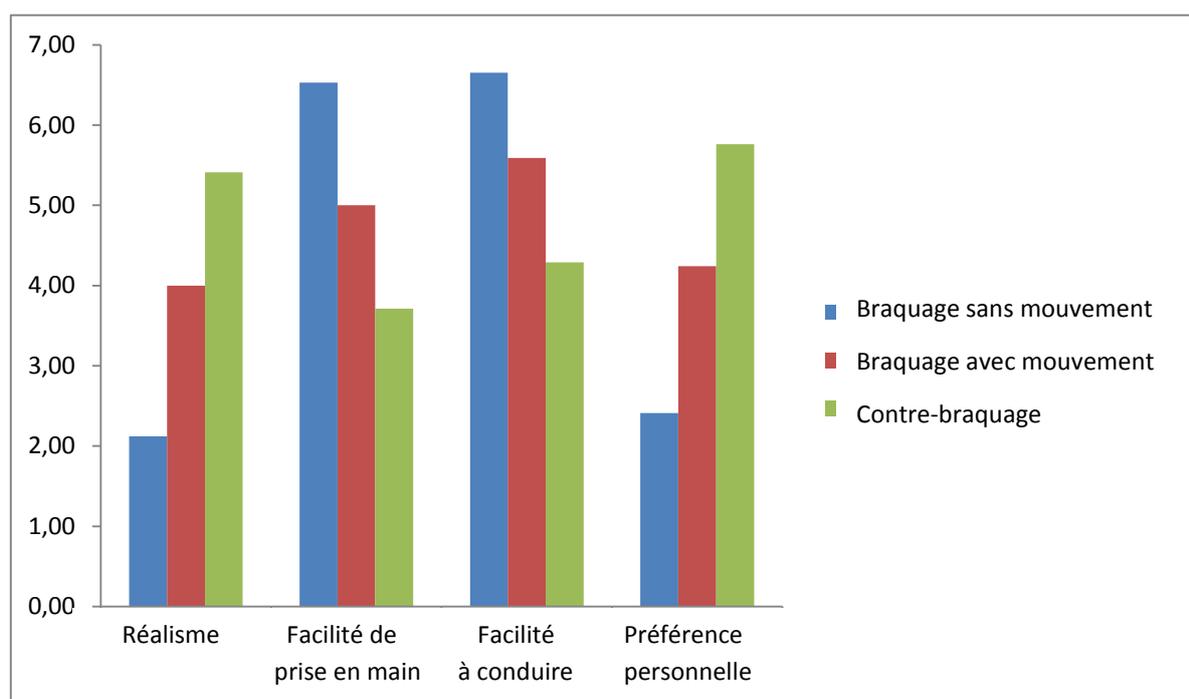
### 5.3.3.1. Comparaison directe entre les configurations

L'ANOVA x 3 Configurations sur les scores moyens obtenus pour chaque dimension (réalisme par rapport à une moto réelle, facilité de prise en main, facilité à conduire et préférence personnelle) a révélé des différences significatives entre les 3 configurations sur chacune des dimensions ( $F(2,32) > 11.7, ps < .005$ ). Le mode braquage sans mouvement a été évalué comme le plus facile à prendre en main et à conduire, mais comme le moins réaliste et le moins apprécié (Figure 30). Le mode contre-braquage a été évalué de façon inverse : difficile à prendre en main et à contrôler, mais le plus réaliste et le plus apprécié.

**Tableau 9 - Scores moyen (ET) au questionnaire de présence (score total et aux sous-échelles) en fonction de la configuration de conduite.**

Echelles (scores max.)	Braquage sans mouvement		Braquage avec mouvement		Contre-braquage	
	Moyenne	%	Moyenne	%	Moyenne	%
Réalisme (49)*	31,9	65,2	34,3	70,0	36,7	74,8
Possibilité d'Agir (28)***	25,0	89,3	24,3	86,9	22,3	79,6
Qualité de l'Interface (21)	17,3	82,5	16,7	79,6	16,2	77,0
Possibilité d'Examiner (21)*	15,9	75,7	15,1	71,7	14,2	67,7
Auto-évaluation (14)**	12,4	88,5	11,3	80,6	9,9	71,0
Auditif (21)	16,8	79,9	16,6	79,1	16,7	79,4
Score total	119,3	77,5	118,3	76,8	115,9	75,3

\*  $p < .05$  ; \*\*  $p < .005$  ; \*\*\*  $p < .001$



**Figure 30 – Scores moyens au questionnaire de comparaison entre les trois configurations de conduite.**

### 5.3.3.2. Comportements de conduite

Les données de position latérale moyenne sur la voie ainsi que de la vitesse moyenne ont été extraites pour respectivement 4 portions, afin d'avoir un regard plus fin sur l'évolution des comportements en fonction de la situation en approche de virage et dans le virage :

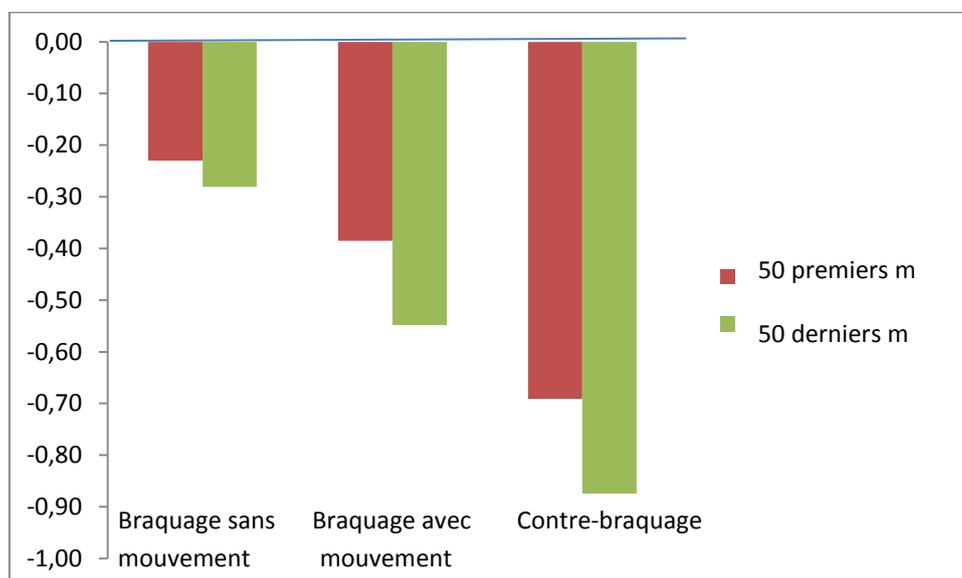
- 50 premiers mètres en ligne droite,

- 50 derniers mètres avant d'avant d'entrer dans le virage,
- première moitié du virage,
- seconde moitié du virage.

Nous avons d'autre part distingué les comportements selon la direction du virage.

### En ligne droite

L'ANOVA 3 Configurations x 2 portions de route (50 premiers et 50 derniers mètres) avant un virage à droite a révélé un effet principal de la configuration ( $F(2,570) = 96.76, p < .001$ ) et de la portion de route ( $F(1,285) = 51.22, p < .001$ ). Les participants ont conduit plus près du centre de la voie dans les 50 premiers mètres, comparativement aux 50 derniers. Ce comportement était observé également pour les configurations en mode braquage comparativement au mode contre-braquage. L'interaction entre les deux variables (Figure 31) était significative ( $F(2,570) = 9.26, p < .001$ ).



**Figure 31 - Position latérale en ligne droite avant l'entrée dans un virage à droite. Le zéro représente le centre de la voie. Les valeurs négatives correspondent à la distance en mètre à droite du centre de voie.**

L'analyse de la position latérale avant l'entrée dans les virages à gauche a mis en évidence un effet principal de la configuration de conduite ( $F(2,858) = 29.68, p < .001$ ) ainsi que de la portion de route ( $F(1,429) = 141.21, p < .001$ ). Les participants se sont davantage positionnés à proximité du centre de voie dans les 50 premiers mètres que dans les 50 derniers, en condition contre-braquage comparativement aux conditions braquage. L'interaction entre ces deux variables (Figure 32) était significative ( $F(2,858) = 11.98, p < .001$ ).

Les résultats de l'analyse effectuée sur la vitesse a révélé un effet principal de la portion de route ( $F(1,715) = 17.6, p < .001$ ), la vitesse moyenne étant légèrement supérieure lors des 50 premiers mètres en ligne droite comparativement aux 50 derniers. L'interaction entre la configuration de conduite et la portion de route était également significative ( $F(2,1430) = 6.72, p = .001$ ), l'effet de la portion de route sur la vitesse provenant principalement de la condition contre-braquage.

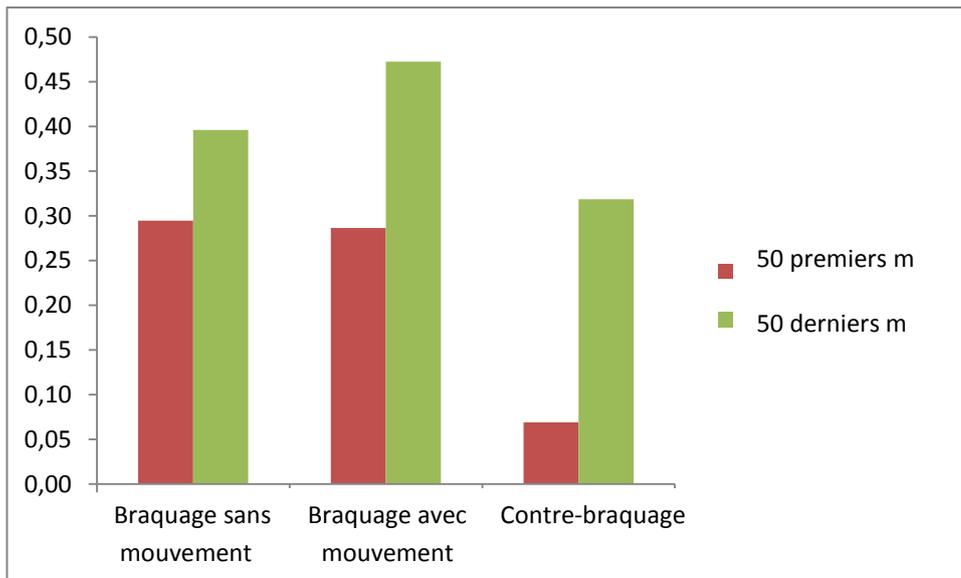


Figure 32 - Position latérale en ligne droite avant l'entrée dans un virage à gauche. Les valeurs positives correspondent à la distance en mètre à gauche du centre de voie.

### En virage

L'analyse sur la position latérale dans les virages à droite a révélé un effet principal de la configuration de conduite ( $F(2,502) = 66.05$ ) et de la portion de virage ( $F(1,251) = 331.11$ ),  $ps < .001$ . L'interaction entre ces deux variables (Figure 33) était également significative ( $F(2,502) = 54.13$ ,  $p < .001$ ).

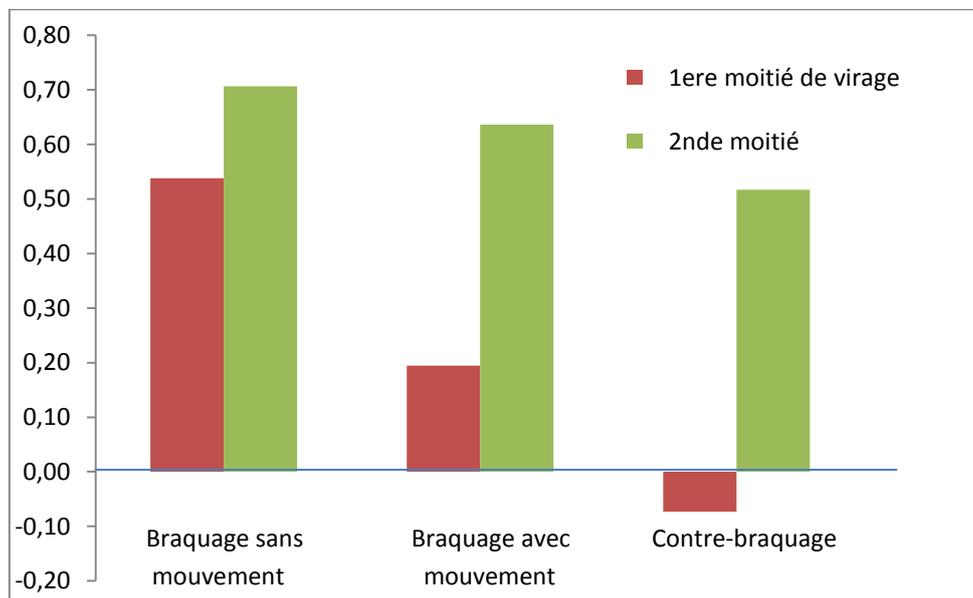


Figure 33 – Position latérale moyenne pour les virages à gauche en fonction de la configuration de conduite. Les valeurs positives (en mètre) indiquent un positionnement à gauche du centre de la voie.

L'analyse sur la position latérale pour les virages à gauche a révélé un effet principal de la configuration ( $F(2,866) = 13.36$ ), de la portion de virage ( $F(1,433) = 292.79$ ,  $ps < .001$ ), ainsi qu'une interaction entre ces deux variables ( $F(2,866) = 67.69$ ,  $p < .001$ ). Les participants se

sont davantage positionnés à proximité du centre de la voie sur la 1<sup>ère</sup> moitié de virage, en condition braquage comparativement à la condition contre-braquage (Figure 34).

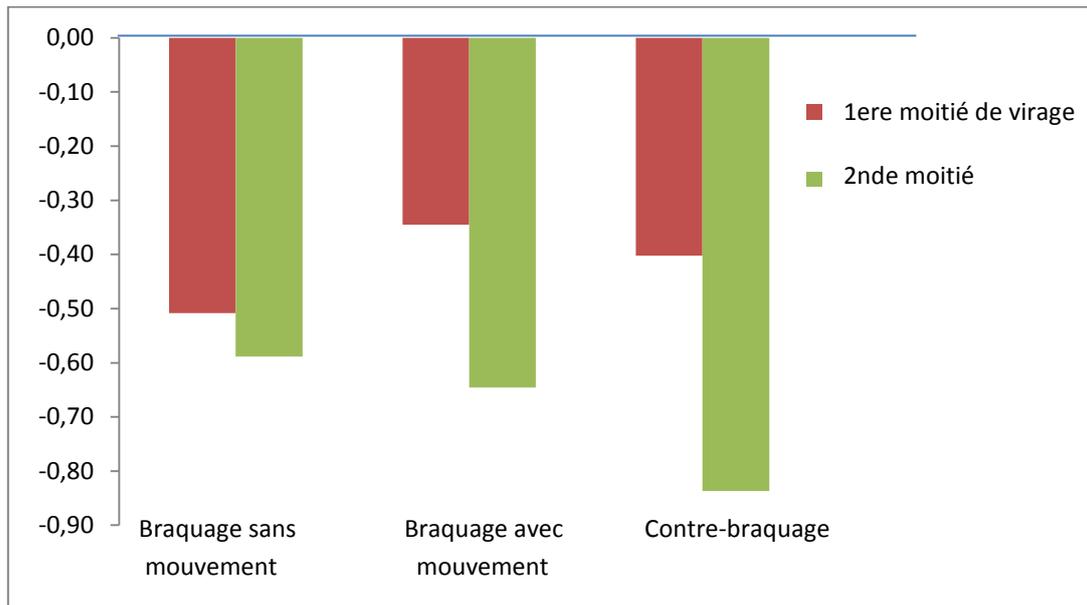


Figure 34 – Position latérale pour les virages à droite en fonction de la configuration de conduite.

L'analyse sur la vitesse (virages à droite et à gauche combinés) a montré un effet principal de la portion de virage ( $F(1,712) = 4.4, p < .05$ ), indiquant des vitesses plus élevées dans la 2<sup>ème</sup> moitié de virage. L'interaction entre configuration de conduite et portion de virage ( $F(2,1430) = 8.41, p < .001$ ) a indiqué que cet effet provenait de la condition contre-braquage.

#### 5.3.4. Etude 2: Discussion

L'objectif de cette étude était de comparer les effets de différents modes de conduite du simulateur sur la survenue du mal du simulateur, le sentiment de présence et les comportements de conduite, en comparant en particulier un mode directement inspiré du simulateur HRT (conduite en braquage sans mouvement de plate-forme, associé à un faible niveau de fidélité), un mode respectant certaines caractéristiques/exigences élémentaires de la conduite moto (mode contre-braquage avec mouvement de la plate-forme) et un 3<sup>ème</sup> mode permettant des comparaisons deux-à-deux et de rendre compte des effets respectifs du contre-braquage et de l'inclinaison en roulis de la plate-forme.

##### 5.3.4.1. Questionnaires

Les scores enregistrés au questionnaire du mal du simulateur ont révélé que les participants avaient très peu, voire pas du tout, ressenti de symptômes associés à ce phénomène. D'une part, les comparaisons entre pré- et post-mesures sur chacune des sous-échelles ont mis en évidence très peu d'effet de la session de conduite (mis à part pour l'échelle 'oculomoteur' pour les configurations braquage) quelle que soit le mode de conduite. D'autre part, les comparaisons entre configurations de conduite sur les scores au questionnaire n'ont pas révélé de différence significative. Ces résultats tranchent avec les premières évaluations effectuées

lors de la précédente étude qui pourraient s'expliquer par des effets propres aux stratégies de commande testées ou bien par la nature des tâches utilisées dans l'étude 1 (qui impliquaient pour les tâches d'évitement et de slalom des changements brusques de trajectoire).

Les scores pour le questionnaire de présence ont également révélé une différence non significative entre les trois configurations de conduite. Les participants se sont d'autre part sentis fortement immergés dans l'environnement (quelle que soit la configuration), les scores en pourcentage approchant le seuil de 80% proposé par Tichon (2007) ou Walsche et al. (2005). Ces scores de présence, bien que recueillis auprès d'une population différente, contrastent fortement avec ceux de la première étude et témoignent soit d'une amélioration notable de la contrôlabilité du simulateur, soit d'un effet de la tâche. Cette réserve pourra être levée avec les études 3 et 4 puisqu'elles ont été effectuées avec la même base visuelle, la même tâche et les mêmes modèles de conduite (braquage sans mouvement lors de l'étude 3 et contre-braquage lors de la dernière étude). Des différences sont néanmoins apparues entre les configurations pour les échelles 'Réalisme', 'Possibilité d'Agir' et 'Auto-évaluation'. La conduite avec le mode contre-braquage a été évaluée comme la plus réaliste et celle en mode braquage sans mouvement comme la moins réaliste. Le pattern de résultat opposé est apparu pour les dimensions 'Possibilité d'agir' et 'Auto-évaluation', les participants se sentant moins compétents pour réaliser la tâche de conduite avec le modèle en contre-braquage. La conclusion avançant que la configuration contre-braquage est la plus réaliste et la plus appréciée mais aussi la plus difficile à contrôler (mais à des niveaux cependant acceptables – voir les scores moyens, Figure 30) est supportée par les résultats à notre échelle de comparaison directe entre les configurations.

#### *5.3.4.2. Comportements de conduite*

L'analyse de la position latérale moyenne a montré que dans les sections de ligne droite, avant d'entrer dans les virages à gauche comme à droite, les participants conduisaient davantage à proximité du centre de voie dans les sections entre 100 et 50 m avant le virage comparativement à leur position dans les 50 derniers mètres. Les données de vitesse ont d'autre part montré une légère réduction de la vitesse avant d'entrer dans le virage pour les trois configurations, avec néanmoins une réduction légèrement plus importante pour la condition contre-braquage.

Dans les virages, les participants ont adopté une trajectoire à proximité du centre de voie avant l'apex, s'excentrant avec l'approche de la sortie de virage. Ces comportements ont été généralement observés pour la condition contre-braquage comparativement à la condition braquage sans mouvement. Malgré ces quelques différences, les participants ont globalement adopté des trajectoires en miroir quelle que soit la configuration. Ils semblent en effet avoir mis en place la même stratégie de prise de virage, reposant sur un déplacement vers l'extérieur du virage (pour ouvrir l'angle) avant de couper le virage.

#### *5.3.4.3. Conclusions*

Alors que cette stratégie pour la prise de virage en conduite moto fait partie intégrante des recommandations formulées par la Motorcycle Safety Foundation (2004), cette étude

constitue une première étape dans l'établissement de la validité du simulateur moto de l'IFSTTAR pour l'étude des comportements des conducteurs, et en particulier la prise de virage. Les résultats ont de plus souligné l'importance pour les participants de l'inclinaison en roulis de la moto et de l'introduction du mode de conduite en contre-braquage. Cependant, cette observation s'appuie uniquement sur les mesures subjectives effectuées. Bien qu'il soit largement reconnu que les simulateurs et leur simulacre ne sont pas en mesure de fournir aux conducteurs l'ensemble des stimulations délivrées en situation réelle (Stoffregen et al., 2003), cette étude confirme néanmoins qu'une expérience réaliste de conduite moto sur simulateur passe par l'introduction de roulis physique (inclinaison de la moto) et par la présence d'un mode de conduite en contre-braquage.

Il est à noter que ces conclusions préliminaires doivent être enrichies de résultats complémentaires reposant sur l'analyse d'autres variables de conduite (nombre de sorties de voie, variabilité de la position latérale, nombre de réversion guidon renseignant sur la difficulté à contrôler la trajectoire) ainsi que sur l'analyse des patterns oculaires, les sujets ayant été équipés d'un oculomètre.

## **6. Tâche 2 : Développement du tracking des mouvements oculaires dans un contexte de simulation de conduite.**

Contributeurs : Fabrice Vienne, Régis Lobjois, Société Pertech (sous-traitant).

Le laboratoire LEPSiS a fait l'acquisition d'un oculomètre Pertech, de type tête porté (Figure 35). Les développements concernés portent sur la synchronisation entre les données oculométriques et les données simulateur et l'intégration de ces dernières dans l'environnement de traitement (logiciel EyeTechLab développé et commercialisé par Pertech) des données oculométriques en vue d'une analyse combinée et dynamique.

L'objectif de ces développements était de pouvoir synchroniser, analyser et corréler les données de l'oculomètre avec les données de conduite provenant d'un simulateur mono-écran, et ce avec le même outil logiciel EyeTechLab. Ce développement a été décomposé en deux parties :

- Réalisation des fonctionnalités permettant une communication temps réel entre le simulateur et l'oculomètre Pertech.
- Réalisation des fonctionnalités permettant l'exploitation des données de conduite issues du simulateur sous le logiciel d'analyse EyeTechLab.



**Figure 35 : Oculomètre Pertech.**

La synchronisation en temps réel des données du simulateur avec les données de mesures oculométriques du logiciel EyeTechPilot via un protocole TCP/IP a été réalisée avec le logiciel de simulation comme serveur TCP/IP (envoi de données simulateur dans une seule trame) et le logiciel de l'oculomètre EyeTechPilot comme client TCP/IP (réception d'une trame de données et ajout de ces données au fichier de sortie EyeTechPilot).

Pour l'importation et l'analyse synchronisée des données de conduite du simulateur avec les données de mesures et vidéos oculométriques sous le logiciel d'analyse et de simulation EyeTechLab, les principaux développements réalisés ont été les suivants :

- Définition et prise en compte du protocole de données simulateur sous EyeTechLab,
- Importation et gestion d'un fichier de données simulateur au format ASCII sous EyeTechLab,
- Datation des données simulateurs,
- Phase de calibration de l'oculomètre supplémentaire sous EyeTechPilot permettant la mise en correspondance de points caractéristiques du simulateur dans un même plan (comme les 4 coins de l'écran du simulateur) avec les coordonnées oculaires,
- Etalonnage des données simulateurs : cet étalonnage suppose d'avoir également en entrée les données du suivi des mouvements de tête enregistrées avec EyeTechMotion, avec un marqueur (passif ou actif) placé en périphérie de l'écran du simulateur, soit dans le référentiel simulateur,
- Calcul de la matrice de passage des coordonnées images simulateur en coordonnées images caméra de scène de l'oculomètre,
- Représentation des données simulateur sous forme de courbes (module Plot EyeTechLab) synchronisables avec les données et vidéo oculométriques,
- Implémentation du suivi automatique de régions d'intérêt simulateurs sous EyeTechLab : suivi automatique de zones d'intérêt simulateurs (nécessite au préalable une définition générique des régions d'intérêt dans un fichier txt représentés par les données suivantes : identifiant, temps simulateur, coordonnées x et y 2D écran simulateur).
- Prise en compte de ces régions d'intérêt dans l'ensemble des traitements et analyses EyeTechLab.

La nature des régions d'intérêt est théoriquement sans fin puisqu'il 'suffit' de connaître les coordonnées 3D des objets ou zones (qui peuvent être définis par une multitude de points) qui nous intéressent. Nous avons ainsi procédé à la phase de test et de validation du suivi des régions d'intérêts avec :

- une zone proche, allant de 2,5 m (correspondant à la distance à l'écran du point d'observation) à 10 m de distance en amont du véhicule piloté (Figure 36),

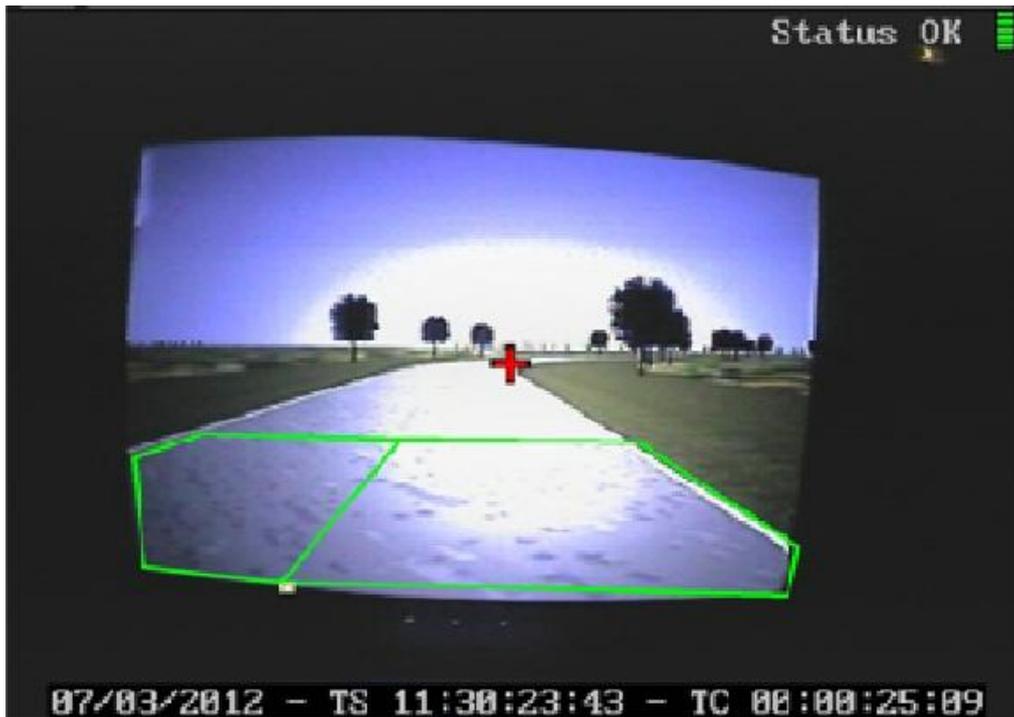


Figure 36 : Illustration du suivi automatique des zones d'intérêt proches.

- une zone intermédiaire, allant de 10 à 30 m en amont du véhicule (Figure 37),



Figure 37 : Illustration du suivi automatique des zones d'intérêt intermédiaires.

- une zone éloignée, allant de 30 m en amont du véhicule au dernier point visible de la route (Figure 38),



Figure 38 : Illustration du suivi automatique des zones d'intérêts éloignées.

- et ce, de part et d'autre du centre de voie, ces différentes zones restant néanmoins circonscrites à la largeur de la chaussée carrossable,
- et enfin une zone point tangent, de 3 degrés de côté (au point d'observation) ainsi que le point tangent lui-même (Figure 39).



Figure 39 : Illustration du suivi automatique de la zone dite point tangent.

Sur chacune des figures, la croix rouge indique la position instantanée du vecteur regard. A noter d'autre part que lorsque toutes les zones sont affichées, certaines d'entre elles se chevauchent (Figure 40). Il est par conséquent possible de gérer des priorités entre les différentes zones d'intérêts lorsque le réticule se pose à des coordonnées correspondant à deux zones d'intérêt. Une priorité a ainsi été donnée à la zone point tangent.

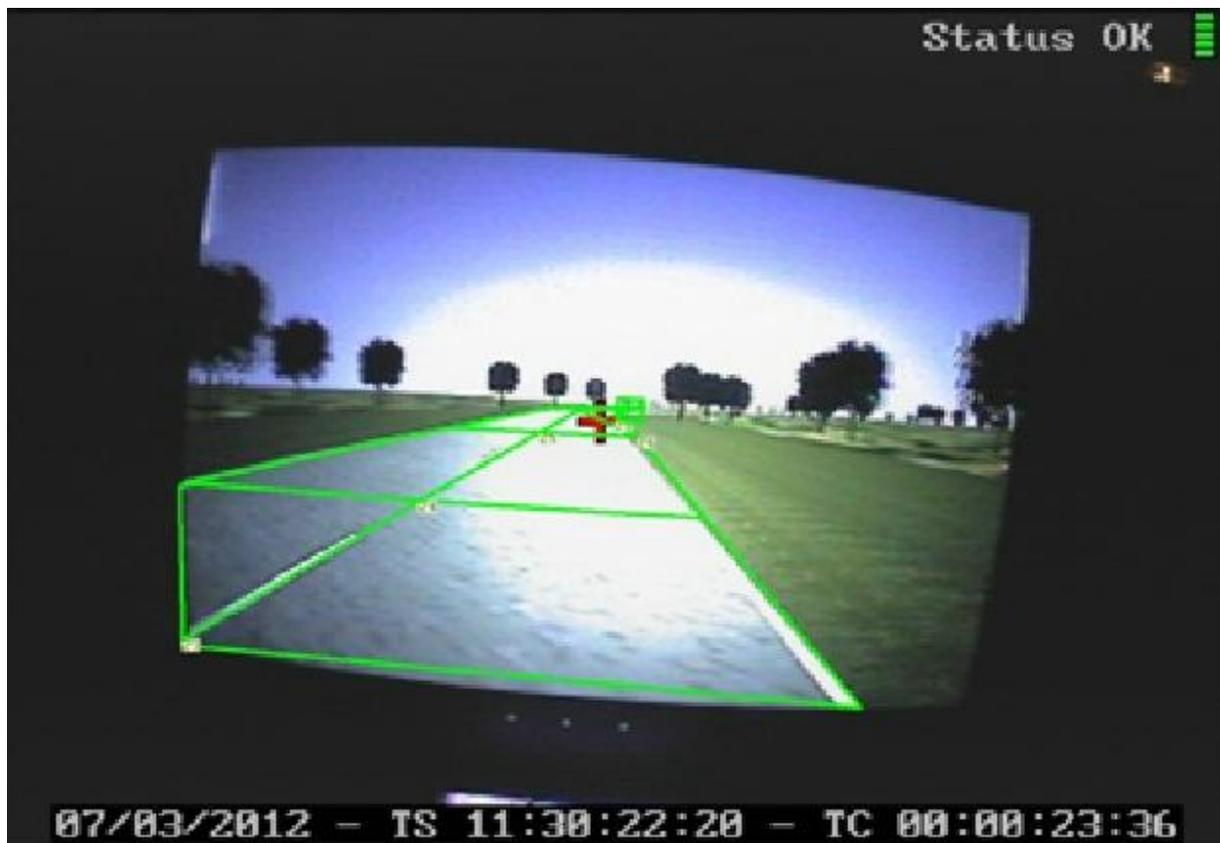


Figure 40 : Illustration du suivi dynamique de l'ensemble des régions d'intérêt.

## 7. Tâche 3 : Effets du roulis visuel sur le contrôle de trajectoire et les stratégies visuelles lors de la prise de virage.

Contributeurs : Régis Lobjois, Franck Mars, Isabelle Siegler.

### 7.1. Problématique

Récemment, les simulateurs de conduite moto sont devenus des outils privilégiés pour étudier les comportements des conducteurs de deux-roues en approche d'intersection et en virage (Crundall et al., 2012 ; Crundall et al., 2013) ou bien leurs capacités à percevoir le danger (Hosking et al., 2010 ; Liu et al., 2009), pour détecter les conducteurs à risque (Di Stasi et al., 2009) et tenter d'améliorer leurs habiletés cognitives (Di Stasi et al., 2011), ou encore pour tester la fiabilité de systèmes d'alerte ou d'aide à la conduite (Huth et al., 2012). Cependant, il

existe une extrême diversité entre les différents simulateurs utilisés (voir le chapitre consacré à la présentation des principaux simulateurs).

Si aucun consensus ne se dégage sur la question de la restitution d'information de mouvement et sur celle de ses effets sur le positionnement objectif et subjectif du conducteur (lié probablement à la limite intrinsèque de toute plate-forme dynamique moto, à savoir l'absence de force centrifuge), un consensus semble néanmoins être trouvé sur la nécessité d'introduire du roulis visuel (inclinaison de la scène dans la direction opposée à celle du virage) pour assurer l'illusion d'inclinaison (Figure 41). Pour Kageyama et Tagami (2002), le facteur d'échelle pour le roulis visuel doit être fixé à 1,2 (20 % de plus que si la physique était respectée) pour générer l'illusion d'inclinaison la plus crédible. Cossalter et al. (2010) ont montré que la sensation d'inclinaison la plus réaliste apparaît lorsque le roulis visuel est proportionnellement plus important que celui du châssis de la moto. Enfin, dans l'étude de Stedmon et al. (2011), la majorité des motocyclistes (10 sur 16) a préféré la configuration où l'horizon était incliné.

Le roulis visuel permet *a priori* de compenser les limites du roulis physique, de même qu'il permet d'aller dans le sens des principes physiques de l'inclinaison en moto en procédant à un rapprochement entre le conducteur et le sol. L'introduction de ce roulis visuel participerait à la fidélité physique de la simulation (Stedmon, 2011).

Alors que ce consensus s'est essentiellement établi à partir de données subjectives, l'introduction du roulis visuel va immanquablement modifier la dynamique de la scène visuelle. D'une part, son introduction entraîne une rotation dans le flux optique. D'autre part, elle perturbe les référentiels spatiaux. Se pose alors la question de ses effets sur la dynamique du regard et sur les stratégies visuelles dans le référentiel 3D de l'environnement.

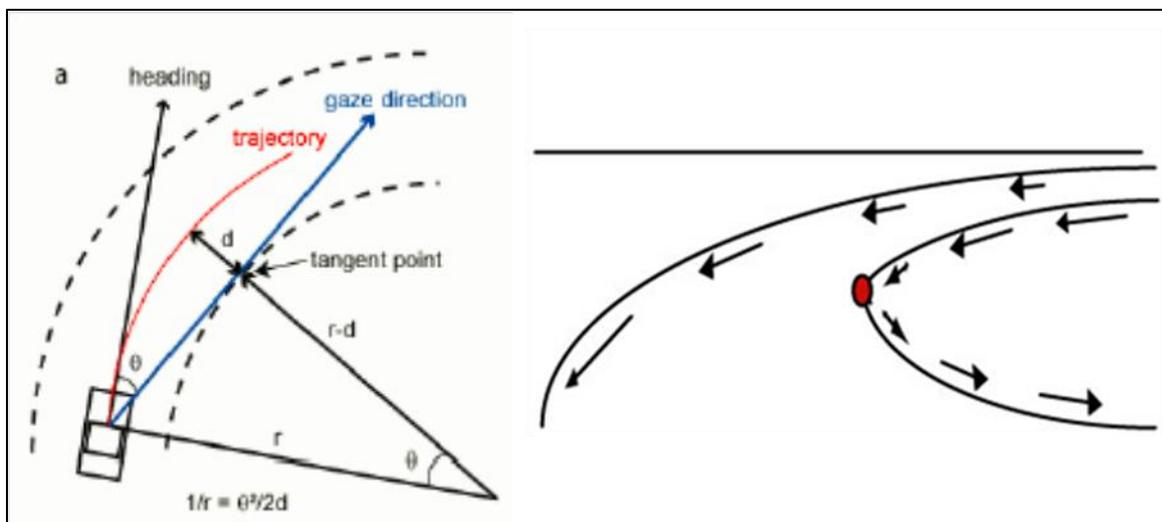


Figure 41 : Illustration de l'inclinaison de la scène visuelle en sens opposé à la direction du virage pour restituer la sensation d'inclinaison en conduite moto sur simulateur.

Il est aujourd'hui largement démontré que les stratégies visuelles et le contrôle de trajectoire lors de la prise de virage entretiennent une relation étroite, bien qu'une controverse existe néanmoins sur les sources d'information visuelle prélevées (Kandil et al., 2009 ; Wilkie,

Wann & Allison, 2008). La robustesse de cette relation fonctionnelle a été mise en évidence chez les conducteurs automobiles (e.g., Land & Lee, 1994) ou les cyclistes (e.g., Wilkie, Wann & Allison, 2008) et est attestée par de multiples démonstrations empiriques, dans des conditions et avec des populations variées : sur route (Kandil et al., 2009), sur simulateur à base fixe (Mars, 2008), avec des conducteurs tout venant (Land & Lee, 1994) comme des pilotes (Land & Tatler, 2001), ou encore avec le point intérieur du virage masqué (Wilson et al., 2007).

Si les stratégies visuelles qui sous-tendent le contrôle de trajectoire consistent à s'appuyer sur le point tangent comme information visuelle d'entrée pour le système moteur (pour une illustration, voir la Figure 42), l'introduction d'un roulis visuel va modifier de fait la dynamique du point tangent (Figure 43) et du regard. Autrement dit, si on fait l'hypothèse que les stratégies visuelles sont préservées dans le référentiel 3D de l'environnement de simulation, plus le roulis visuel va être important, plus le regard va avoir une dynamique en rotation qui va s'ajouter à la dynamique (classique) déterminée par la scène visuelle.



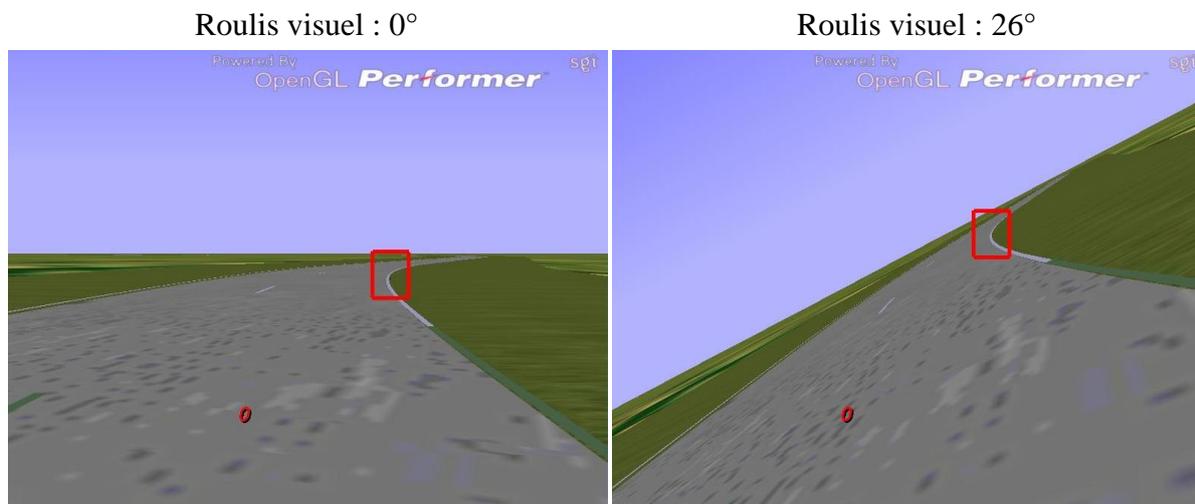
**Figure 42 : Illustration du point tangent. Ce point correspond à l'intersection entre le bord intérieur du virage et la tangente, au point d'observation, à la courbure intérieure de ce même virage (schéma de gauche). Du point de vue visuel, il correspond au point d'inversion des lignes de flux contenues dans le flux optique.**

Différentes questions sont donc soulevées :

- Le couplage naturel entre stratégies visuelles et contrôle de trajectoire est-il préservé, vérifié dans le repère du monde 3D ?
- Quel est l'impact de l'introduction du roulis visuel sur les stratégies visuelles et le contrôle trajectoire ?
- Quelle interaction avec la restitution physique du roulis ?

Deux expérimentations différentes ont donc été menées afin de fournir des éléments de réponse à ces questions. Dans ces expériences, il s'agissait de manipuler le roulis visuel (aucun roulis, roulis moyen, roulis important) avec l'objectif d'analyser ses effets sur les comportements de conduite (contrôle de trajectoire) et les stratégies visuelles. La première expérience a été réalisée avec le simulateur moto dans sa version statique afin d'éliminer

d'éventuelles influences de la restitution de mouvement via la plate-forme dynamique. La seconde expérience a par contre été effectuée avec le simulateur dans sa version dynamique.



**Figure 43 :** Illustration de l'incidence, sur le point tangent, d'une inclinaison de 26 degrés en roulis. Le rectangle rouge matérialise une zone de  $3 \times 4^\circ$  de côté autour du point tangent. Dans l'image de droite, le point tangent subit un déplacement de  $+0,15^\circ$  sur l'axe horizontal et de  $+4,2^\circ$  sur l'axe vertical, comparativement à l'image de gauche, pour un véhicule positionné 20 cm à l'intérieur du virage par rapport au centre de sa voie.

## 7.2. Etude 3 : Effet du roulis visuel sur le contrôle visuel de la trajectoire et les performances de conduite sur simulateur statique.

### 7.2.1. Méthodes

#### 7.2.1.1. Participants

Douze motocyclistes ont pris part à l'expérience (voir Tableau 1). Un treizième participant a réalisé le protocole dans son ensemble, mais du fait de l'impossibilité de calibrer l'oculomètre, ses données n'ont pas été analysées. Ils ont été recrutés suite à une campagne d'information diffusée dans le journal spécialisé MotoMag ou sur le site internet du journal, avec le concours de la FFMC. Les participants devaient, pour être recrutés, posséder le permis A et conduire un minimum de 5000 km par an. Tous avaient une vision normale ou corrigée, et aucun ne souffrait de migraine, épilepsie ou du mal des transports. Cinq des participants conduisaient une moto de cylindrée comprise entre 600 et 750  $\text{cm}^3$ , les 7 autres, une cylindrée supérieure à 1000  $\text{cm}^3$ . L'étude a été approuvée par le comité d'éthique de l'IFSTTAR. Les participants ont été indemnisés à hauteur de 40 euros pour leur participation.

#### 7.2.1.1. Dispositif expérimental

##### 7.2.1.1.1. Simulateur moto

L'expérience a été réalisée sur le simulateur de conduite moto de l'IFSTTAR dans sa version statique (pas de restitution de roulis physique), avec comme modèle de conduite le modèle dit basique utilisé dans l'étude 2 (conduite en braquage direct – tourner le guidon dans le sens de

la direction recherchée). L'inclinaison était rendue par l'intermédiaire du roulis visuel (lorsque présent puisque le roulis visuel constituait la variable manipulée – voir la partie plan expérimental), le centre de rotation de l'inclinaison étant placé au centre de la ligne d'horizon.

**Tableau 10: Caractéristiques de l'échantillon de l'étude 3.**

	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Age	35,6	11,9	22,5	55,8
Permis B (an)	16,59	11,53	3	36
Km/an	12916	12738	1000	45000
Permis A (an)	13,75	11,99	2	36
Km/an	14250	7021	5000	30000
Heures/semaine	14,41	12,97	5	50
Type de route fréquentée (%)				
Urbain	36,2	20,8	5	70
Péri-urbain	42,1	22,9	0	70
Rural	21,7	19,5	0	70

La scène visuelle était projetée via un projecteur Projection-design F-22 sur un écran. La taille de l'image (larger: 1.85 m; hauteur: 1.24 m) générait un champ visual de 60 x 40 degrés, avec les participants en position de conduite placés à 1.65 m de l'écran. Les images (fréquence de rafraîchissement fixée à 30Hz) étaient calculées et projetées à hauteur de l'oeil de chacun des participants, et l'angle de vue simulé était dirigé vers le point de disparation de la route.

Le même circuit que dans les études 1 et 2 a été utilisé (Figure 22). La scène consistait en une route à double sens, sans trafic, en environnement rural (bordée d'arbres), dont les voies étaient larges de 3,5 m. La surface de la route était grise et les marquages centraux et latéraux étaient affichés. Le circuit, d'une longueur de 6,240 km, consistait en une alternance entre une portion de ligne de droite de 100 m de long et un virage, les virages (n = 20) ayant différentes longueurs, différents rayons de courbure et différents angles de courbure (Tableau 11). Dans cet ensemble de virages, 12 sont des virages à gauche et 8 des virages à droite. Leur longueur était de 78, 157, 235, 314 ou 471 m.

**Tableau 11 : Caractéristiques des virages du circuit utilisé.**

Rayon	Angle	Nb Virages à D	Nb Virages à G
150	30	2	2
	60	2	2
	90	-	2
300	30	2	2
	60	2	2
	90	-	2

#### 7.2.1.1.2. Oculomètre

Un oculomètre monoculaire dit tête portée, de la marque Pertech, a été utilisé pour enregistrer les mouvements oculaires (Figure 35). Cet oculomètre, basé sur le principe d'une paire de lunette (dans sa structure), a une fréquence d'enregistrement de 50 Hz et une précision 0.25°. Il utilise une technologie de suivi de la pupille (et non de reflet cornéen, ce qui présente l'avantage de n'avoir aucun "miroir" présent dans le champ de vision de l'utilisateur). Une calibration en 7 points est utilisée avant tout enregistrement.

#### 7.2.1.2. Tâche et plan expérimental

La tâche consistait pour les participants à parcourir deux tours du circuit, en respectant la limite de vitesse (100 km/h) et en restant sur leur voie.

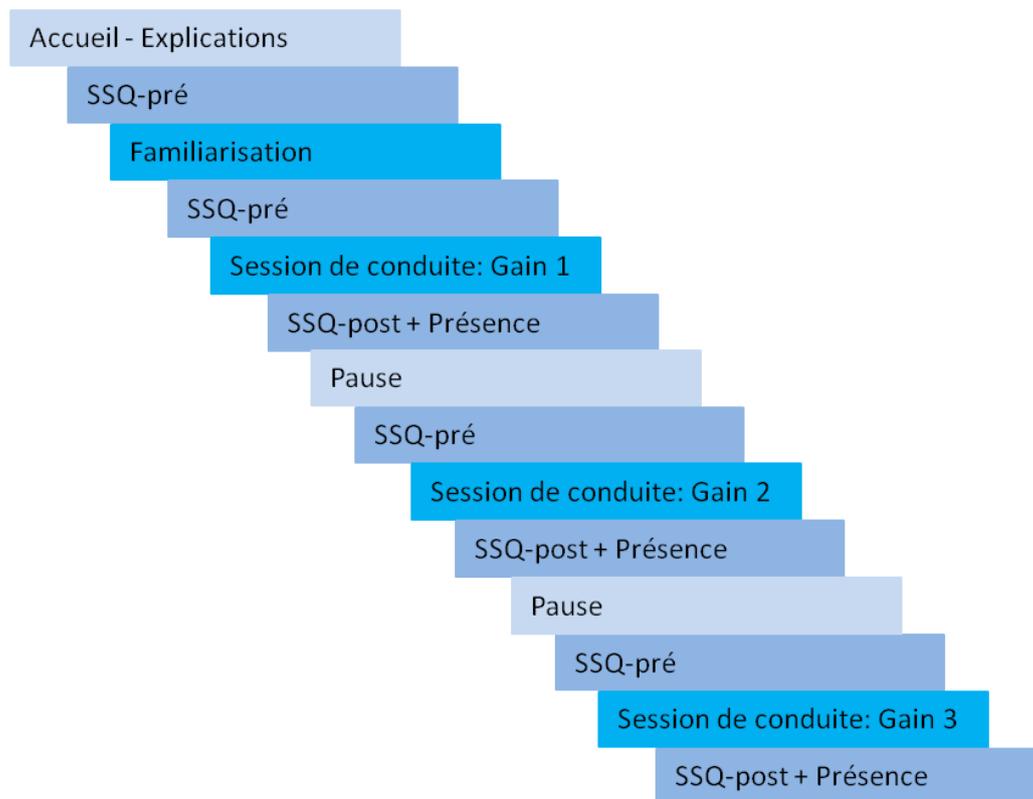
Trois gains visuels différents ont été présentés aux participants: 0 (pas de roulis visuel), 0.2 (roulis visuel reproduisant 20% de l'inclinaison d'une moto réelle compte tenu de la vitesse de passage et du rayon de courbure) et 0.4 (roulis visuel reproduisant 40% de l'inclinaison d'une moto réelle). A noter que ces gains ont été intégrés à l'algorithme de restitution du mouvement. Par conséquent, le roulis visuel restitué au cours de l'expérience pour les gains de 0.2 et 0.4 dépendait de la vitesse de passage dans chacun des virages. L'enregistrement du roulis visuel au cours de l'expérience a permis d'effectuer un contrôle de l'amplitude du roulis auquel les participants ont été exposés.

#### 7.2.1.3. Procédure

A leur arrivée, les participants ont complété le formulaire de consentement ainsi que le questionnaire d'informations générales. Le principe de l'expérimentation leur a ensuite été présenté. Une phase de familiarisation à la conduite consistant en deux tours de circuit a été réalisée. Ces deux tours de circuit ont également servi d'entraînement aux participants pour le respect de la vitesse de consigne, le compteur de vitesse n'ayant pas été affiché pendant l'expérimentation proprement dite pour éviter les détournements de regard. Les participants ont ainsi effectué un premier tour avec le compteur de vitesse, puis un second sans le compteur. Au cours de ce 2<sup>ème</sup> tour, l'expérimentateur signalait oralement aux participants lorsque leur vitesse était inférieure ou supérieure de 20 km/h à la vitesse de consigne. Au cours de ces 2 tours de familiarisation, le gain visuel était de 0.1 ou 0.3, et leur ordre de présentation était contrebalancé. L'expérimentation proprement dite consistait donc en 3 sessions de conduite différentes, avec une pause entre chaque session. L'ordre de présentation des 3 gains visuels était contrebalancé.

Les participants ont également complété le questionnaire du SSQ et le questionnaire de présence (Figure 43). Le SSQ a été rempli une 1<sup>ère</sup> fois à l'arrivée (état de base du participant), puis avant et après chaque session de conduite. Ces passations donnent la possibilité d'appréhender l'effet de l'exposition au simulateur, ainsi que l'effet de chacun des gains visuels. Le questionnaire de présence a quant à lui été complété après chaque session de conduite (hormis la familiarisation). En toute fin d'expérience, les participants étaient invités

à classer les trois sessions de conduite en fonction du confort/inconfort visuel ressenti et de ses relations avec la conduite.



**Figure 44 : Procédure expérimentale suivie.**

#### *7.2.1.4. Analyse des données*

Les différentes variables dépendantes retenues ont été calculées pour chaque virage. Les données de ligne droite, ainsi que les sorties de route ont été exclues des traitements.

##### *7.2.1.4.1. Analyse de l'effet du gain visuel sur la dynamique de la scène et du point tangent*

Afin de vérifier l'effet de la manipulation du gain visuel, nous avons déterminé :

- le roulis visuel auquel les participants ont été effectivement exposés, cette variable dépendant des stratégies de conduite et en particulier de la vitesse de passage et de la trajectoire empruntée par le conducteur, avec le roulis visuel moyen en degré et l'écart-type, ainsi que le roulis maximum et son écart-type ;
- la déviation du point tangent au centre de l'image. Nous avons utilisé le point tangent comme référence objective dans le référentiel du monde 3D, son comportement dans la scène étant connu sur la base du rayon de courbure de la trajectoire et de la position latérale du véhicule dans sa voie. En déterminant les déviations de ce point par rapport au centre de l'image, l'objectif était de quantifier les modifications subies par le point tangent avec ou sans roulis visuel. Ont été calculées :

- la distance au centre de l'image, en degré (moyenne et écart-type), sur l'axe des x pour rendre compte des variations horizontales et sur l'axe de y pour rendre compte des déviations verticales,
- la distance minimale et la distance maximale au centre de l'image, sur les deux axes, pour rendre compte de l'amplitude des variations subies par le point tangent en fonction du gain visuel.

Pour cette variable, les données ont été redressées afin d'avoir une référence identique pour les virages à gauche et à droite. Avec le centre de l'image comme origine de notre plan, on obtient ainsi des coordonnées (en x et en y) positives lorsque le point tangent se situe dans le virage au-delà du centre de l'image, et des valeurs négatives lorsque le point se situe en-deçà du centre de l'image.

#### 7.2.1.4.2. Données oculaires

Différentes variables positionnant le regard par rapport au point tangent ont été calculées :

- la distance moyenne au point tangent (et écart-type) en degré sur l'axe horizontal ;
- la distance moyenne au point tangent (et écart-type) en degré sur l'axe vertical ;
- la proportion de directions oculaires en fonction de la distance au point tangent (de -15 à +15°, par pas de 1°) sur l'axe des x (ce qui permet de prendre en compte dans une analyse l'ensemble des directions oculaires instantanées, et de rendre compte de la dynamique du regard par rapport au point tangent) ;
- la proportion de directions oculaires en fonction de la distance au point tangent sur l'axe des y,  
en procédant également pour ces variables à un redressement des données pour disposer d'une référence identique pour les virages à gauche et à droite. Des valeurs positives indiquent ainsi des directions oculaires se situant au-delà du point tangent (en anticipation), et des valeurs négatives indiquent des directions oculaires en-deçà du point tangent (ne retard) ;
- la dispersion moyenne des directions oculaires en absolu (indépendamment du point tangent, référencées au centre de l'image) sur l'axe des x ;
- la dispersion moyenne des directions oculaires en absolu (indépendamment du point tangent, référencées au centre de l'image) sur l'axe des y.

#### 7.2.1.4.3. Comportements de conduite

Différentes variables ont été calculées :

- la vitesse moyenne et son écart-type, en km/h,
- l'écart latéral au centre de la voie (moyenne et écart-type, en cm), ce qui permet, accessoirement, d'accéder aux stratégies de prise de virage. Ces données ont également été redressées. On obtient ainsi des valeurs positives lorsque le conducteur coupe le virage et se trouve donc davantage vers l'intérieur du virage et des valeurs négatives lorsque le conducteur prend le virage large,
- la variabilité de l'écart latéral,
- et enfin le nombre de réversions de la direction du guidon par minute (ou Steering Reversal Rate - SRR), comme mesure de la difficulté à contrôler la trajectoire, en nous

basant sur la méthode des extrema locaux de Jamson et Merat (2005) et Engström, Johansson et Östlund (2005) adaptée à la conduite sur route sinueuse. Pour calculer le SRR, il est nécessaire de choisir un seuil de l'angle du guidon au-delà duquel le changement de sens du guidon est considéré comme une réversion. A titre d'exemple, les seuils utilisés par McLean et Hoffman (1975) vont jusqu'à 10°. Le seuil utilisé par Deborne, Barthou, Toffin, Reymond et Kemeny (2008) était de 2°, celui utilisé par Jamson et Merat (2005) et Engström, Johansson et Östlund (2005) de 1°. Compte tenu du modèle de véhicule utilisé, à 100 km/h et pour une trajectoire épousant parfaitement la courbure de la route, l'angle de braquage est d'environ 9.96° pour un virage ayant un rayon de courbure de 150 m et d'environ 5.29° pour un rayon de courbure de 300 m. Ces angles de braquage indiquent une faible sensibilité du guidon. D'autre part, l'angle de braquage moyen calculé sur l'ensemble des données obtenues (indépendamment du participant et du gain visuel) était de 5,37°. Sur la base de ces informations, un seuil de 1° a été utilisé pour le calcul du SRR (seuil identique pour tous les participants),

- le nombre de sorties de voie.

Ces variables ont été analysées à partir d'une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées sur le facteur Gain visuel, avec un seuil de significativité fixé à .05. Lorsque nécessaire, un test a posteriori de Newman-Keuls a été effectué afin de mettre en évidence les différences significatives.

## 7.2.2. Résultats

### 7.2.2.1. Effet du gain visuel sur la dynamique de la scène et du point tangent

#### 7.2.2.1.1. Roulis visuel

Les tests de comparaison de moyenne à un standard (Gain 0) réalisés sur le roulis visuel moyen (Tableau 12) ont révélé des différences significatives entre le gain 0 et le gain 0,2 ( $t(11) = 25.89, p < .0001$ ) et entre le gain 0 et le gain 0.4 ( $t(11) = 29.98, p < .0001$ ). Le test  $t$  réalisé entre les gains 0.2 et 0.4 a également révélé une différence significative sur le roulis visuel moyen ( $t(11) = 17.59, p < .0001$ ).

Ces mêmes tests ont été réalisés sur le roulis visuel max (Tableau 12) et révélé des différences significatives entre les trois gains ( $ts(11) > 18, ps < .0001$ ).

**Tableau 12 : Roulis visuel moyen et maximum (et écart-type) en fonction du gain visuel.**

	Roulis visuel (degré)			
	Moyen		Max	
	M	ET	M	ET
Gain 0	0,00	0,00	0,00	0,00
Gain 0,2	4,06	1,29	5,11	1,56
Gain 0,4	8,57	2,62	10,80	3,11

### 7.2.2.1.2. Position du point tangent par rapport au centre de l'image

L'ANOVA (x 3 gains visuels) à mesures répétées sur la distance du point tangent au centre de l'image sur l'axe horizontal n'a pas révélé d'effet significatif du roulis sur la moyenne, l'écart-type, la distance minimale et maximale. Les positions moyenne, minimum et maximum du point tangent par rapport au centre de l'image ne sont donc que peu modifiées avec l'introduction du roulis visuel (Tableau 13).

L'ANOVA (x 3 gains visuels) à mesures répétées sur la distance du point tangent au centre de l'image sur l'axe vertical a révélé un effet du gain visuel sur la position moyenne ( $F(2,22) = 20.64, p < .0001, \eta^2 = .65$ ), la variabilité de cette position ( $F(2,22) = 29.96, p < .0001, \eta^2 = .73$ ) et la position maximale ( $F(2,22) = 85.07, p < .0001, \eta^2 = .89$ ) du point tangent par rapport au centre de l'image (Tableau 13), les test post-hoc ayant montré des différences significatives entre les trois gains pour chacune de ces variables. Ces résultats confirment ainsi que la position moyenne du point tangent dans le référentiel de l'image est modifiée avec l'introduction du roulis visuel et que la variabilité de cette position ainsi que l'amplitude des mouvements subis par le point tangent augmentent.

**Tableau 13 : Position moyenne (et écart-type), minimum et maximum du point tangent par rapport au centre de l'image pour l'axe horizontal et vertical en fonction du gain visuel.**

PT/centre image (degré)				
Axe horizontal				
	M	ET	Min	Max
Gain 0	5,90	0,84	4,38	7,42
Gain 0,2	5,85	0,88	4,27	7,47
Gain 0,4	5,91	0,89	4,33	7,62
Axe vertical				
	M	ET	Min	Max
Gain 0	-0,62	0,50	-2,11	0,24
Gain 0,2	-0,35	0,67	-2,21	0,69
Gain 0,4	-0,13	0,91	-2,70	1,16

### 7.2.2.2. Comportements oculaires

#### 7.2.2.2.1. Distance au point tangent des directions de regard

L'ANOVA sur la distance au point tangent des directions de regard n'a pas révélé d'effet significatif du gain visuel sur l'axe horizontal. Le regard était globalement dirigé autour de 3° au-delà du point tangent (en anticipation, et donc davantage vers l'intérieur du virage) quel que soit le gain visuel (Tableau 14).

Sur l'axe vertical (Tableau 14), l'ANOVA a révélé un effet significatif du gain visuel sur la distance moyenne au point tangent ( $F(2,22) = 4.54, p < .05, \eta^2 = .30$ ) et sur la variabilité de cette distance ( $F(2,22) = 36.69, p < .0001, \eta^2 = .71$ ). Les tests post-hoc ont montré des

différences significatives entre le gain 0,4 et les deux autres gains pour la distance moyenne, et des différences significatives entre les trois gains pour la variabilité. Bien que le regard soit globalement positionné environ 2° au-dessus du point tangent, ces résultats montrent que la distance moyenne au point tangent des directions oculaires et sa variabilité augmentent avec le gain visuel.

**Tableau 14 : Distance (moyenne et écart-type) au point tangent des directions de regard sur l'axe horizontal et vertical en fonction du gain visuel.**

	Distance au PT			
	Axe horizontal		Axe vertical	
	M	ET	M	ET
Gain 0	3,32	3,24	1,80	1,10
Gain 0,2	2,70	3,15	1,94	1,30
Gain 0,4	2,88	3,08	2,49	1,59

#### 7.2.2.2.2. Proportion des directions de regard en fonction de la distance au point tangent

Sur l'axe des x comme des y, une ANOVA 3 Gains visuels x 32 Distances au point tangent (de -15 à +15°, par pas de 1°) à mesures répétées a été réalisée.

Sur l'axe horizontal, une nouvelle fois, l'analyse n'a pas révélé d'effet du gain visuel sur les proportions de directions de regard. Seul un effet de la distance est apparu ( $F(31,341) = 48.64, p < .0001, \eta^2 = .82$ ). La Figure 45 illustre la similarité de la distribution des directions oculaires en fonction de la distance au point tangent entre les trois conditions de gain visuel. Elle montre, d'autre part, les différences de proportions de directions oculaires en fonction de la distance au point tangent, avec un pic de directions oculaires (16%) se situant entre 1 et 2° en amont du point tangent, puis des directions fortement concentrées en anticipation. Environ 40% des directions sont concentrées entre 0 et 3°, et 40% au-delà de 3°. Elle illustre également les résultats de la distance moyenne au point tangent, les directions oculaires sur l'axe horizontal se situant globalement 3° au-delà du point tangent (décalage de la distribution vers la droite) quel que soit le gain visuel.

Sur l'axe vertical, l'analyse a révélé un effet principal de la distance ( $F(31,341) = 83.7, p < .0001, \eta^2 = .88$ ) ainsi qu'une interaction entre le gain visuel et la distance entre direction du regard et point tangent ( $F(62,682) = 2.57, p < .0001, \eta^2 = .19$ ). Le test post-hoc sur l'effet de la distance a mis en évidence des différences deux-à-deux entre les classes allant de -3° à +6° par rapport au point tangent. L'analyse a posteriori pour l'interaction entre le gain visuel et la distance (Figure 46) a montré :

- entre les gains 0 et 0,2, des différences significatives entre les proportions de directions oculaires pour les classes 1 à 2° (28,6% et 23,6% pour les gains 0 et 0,2, respectivement) et 2 à 3° (19,6% et 16,9% pour les gains 0 et 0,2, respectivement), la classe 1-2° correspondant au pic de proportion ;

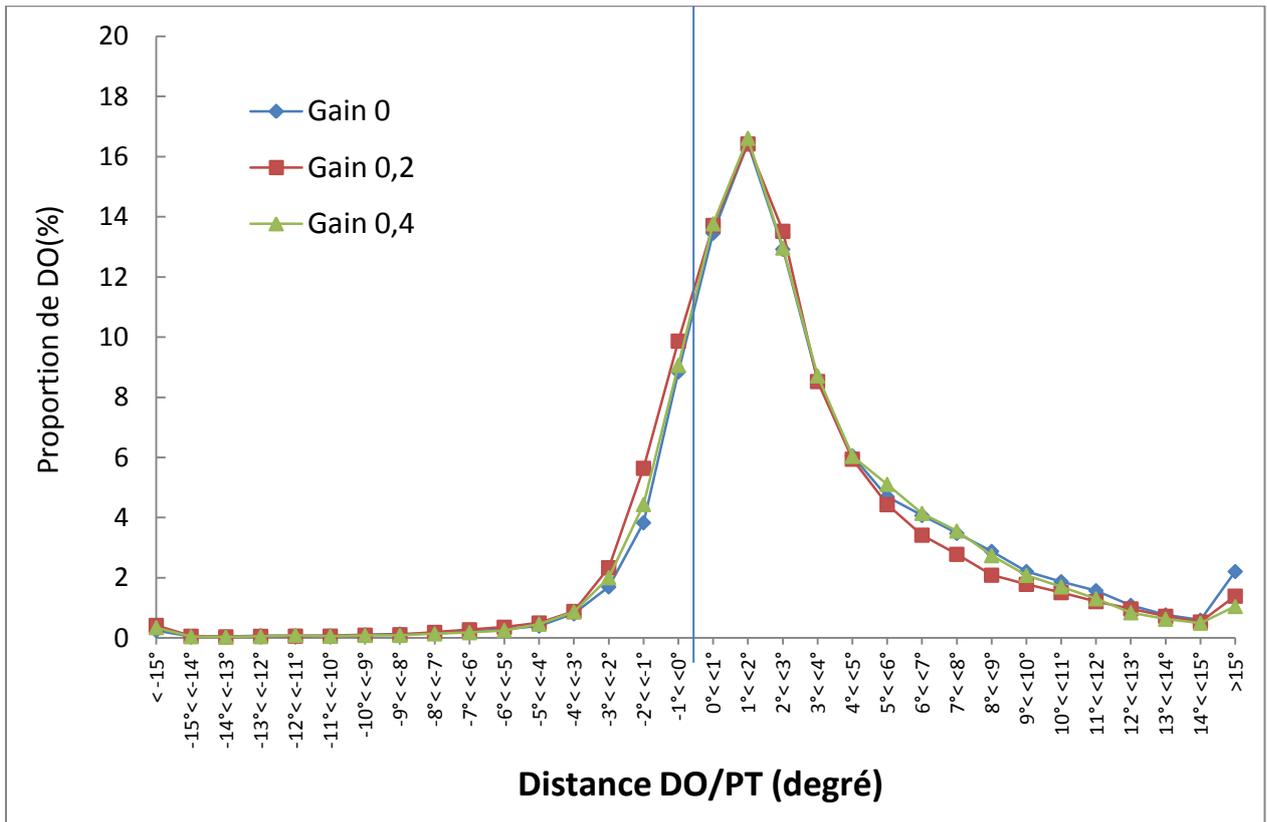


Figure 45 : Proportion, sur l'axe horizontal, de directions de regard en fonction du gain visuel et de la distance (en degré) au point tangent.

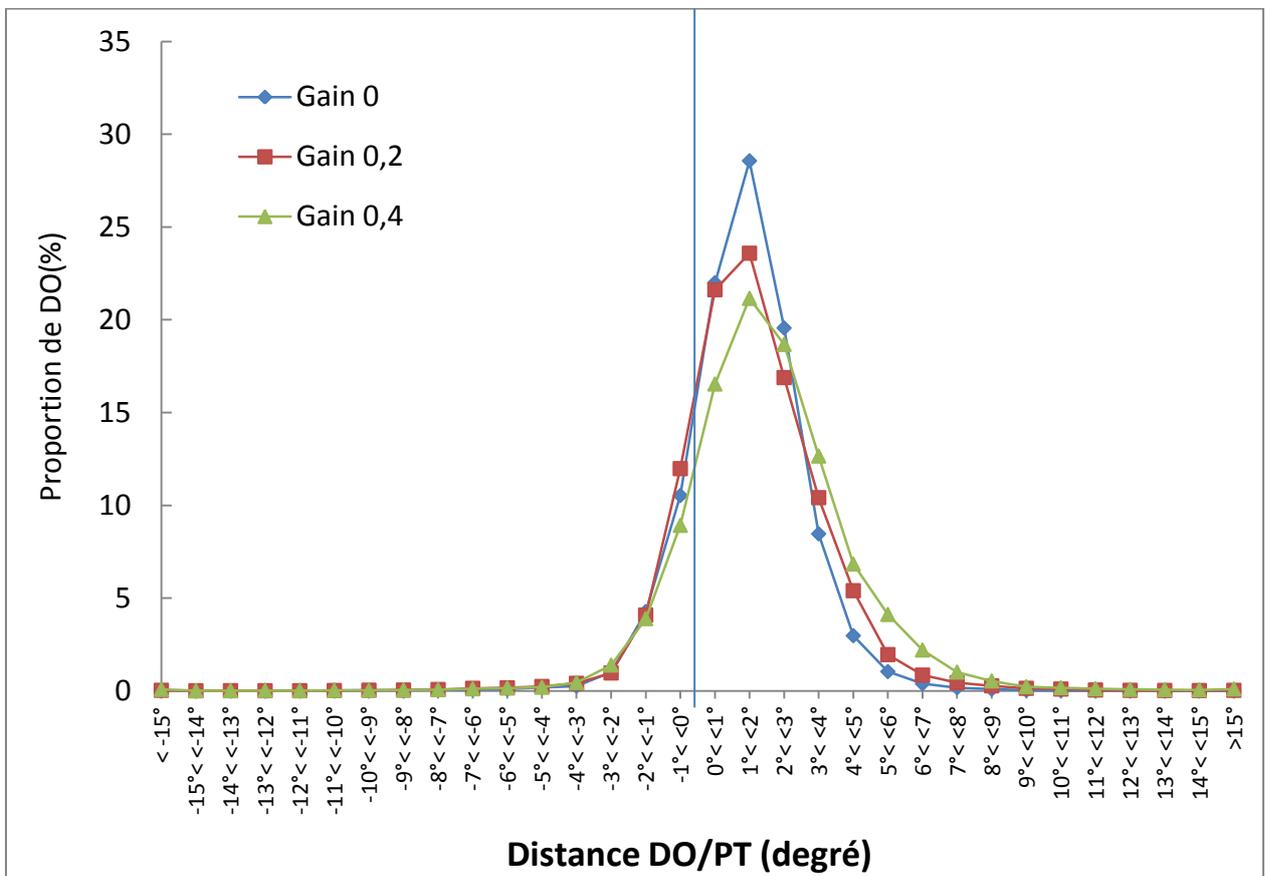


Figure 46 : Proportion, sur l'axe vertical, de directions de regard en fonction du gain visuel et de la distance (en degré) au point tangent.

- entre les gains 0 et 0,4, des différences significatives entre les classes allant de 0° à +6° par rapport au point tangent (exceptée la classe 2-3°), avec des proportions supérieures pour le gain 0 pour les classes 0-1° et 1-2°, mais des directions oculaires en plus grand nombre pour le gain 0,4 pour les classes 3-4°, 4-5° et 5-6°. Comme l'illustre la Figure 46, ces différences significatives correspondent à une concentration plus importante de directions oculaires entre 0 et 2° pour le gain 0, et un positionnement du regard plus en anticipation pour le gain 0,4 ;
- entre les gains 0,2 et 0,4, des directions oculaires significativement plus nombreuses sur les classes -1-0° et 0-1° pour le gain 0,2.

#### 7.2.2.2.1. Dispersion des directions de regard (référéées au centre de l'image)

La dispersion moyenne des directions de regard référencées au centre de l'image donne des indications sur la variabilité des directions oculaires dans le plan de l'image et donc de l'environnement 3D, et non plus spécifiquement rapportées au point tangent.

L'ANOVA réalisée n'a pas révélé d'effet significatif du gain visuel pour l'axe horizontal. Pour l'axe vertical, l'analyse a mis en évidence un effet du gain visuel sur la dispersion ( $F(2,22) = 13.27, p < .001, \eta^2 = .55$ ), la variabilité verticale des directions de regard étant significativement plus importante pour le gain 0,4 comparativement aux deux autres (Tableau 15).

**Tableau 15 : Dispersion des directions de regard en fonction du gain visuel.**

	Dispersion moyenne (degré)	
	(non référée au point tangent)	
	Axe horizontal	Axe vertical
Gain 0	3,38	0,96
Gain 0,2	3,20	1,06
Gain 0,4	3,14	1,28

#### 7.2.2.3. Comportements de conduite

Les ANOVAs réalisées sur la vitesse moyenne et le nombre d'inversion guidon n'ont pas révélé d'effet du gain visuel (Tableau 16).

Les analyses ont mis en évidence un effet significatif du gain visuel sur l'écart latéral moyen ( $F(2,22) = 20.25, p < .001, \eta^2 = .65$ ), l'écart au centre de voie augmentant de manière significative en présence de roulis visuel (i.e., absence de différence entre les gains 0.2 et 0.4), sur la variabilité de l'écart latéral ( $F(2,22) = 6.64, p < .01, \eta^2 = .38$ ), la trajectoire empruntée étant significativement plus variable pour le gain visuel de 0.4 (absence de différence entre les gains 0 et 0.2), et sur le nombre de sorties de voie ( $F(2,22) = 11.16, p < .001, \eta^2 = .50$ ), ce nombre augmentant en présence de roulis visuel (absence de différence entre les gains 0.2 et 0.4).

**Tableau 16 : Moyenne (et écart-type) de la vitesse, de l'écart latéral au centre de voie, de la variabilité de cet écart et nombre d'inversion guidon et de sorties de voie en fonction du gain visuel.**

	Vitesse (km/h)	Ecart latéral (en cm / centre de voie)	Variabilité de l'écart latéral (cm)	Nombre d'inversion guidon	Nombre de sorties de voie
Gain 0	105,3 (3,95)	48,28 (32,24)	29,28 (10,27)	46,74 (18,07)	1
Gain 0,2	104,1 (4,66)	60,48 (31,55)	30,6 (11,05)	46,1 (18,92)	12
Gain 0,4	107,0 (4,35)	65,6 (31,23)	32,82 (11,95)	44,84 (19,39)	13

#### 7.2.2.4. Questionnaire du mal du simulateur

Les résultats au SSQ sont présentés dans le Tableau 17 et illustrés en Figure 47.

Une première ANOVA a été réalisée sur le score global en fonction du gain visuel afin de connaître l'effet de ce facteur, indépendamment du moment de passation et de la sous-échelle, sur le mal du simulateur. L'analyse n'a pas révélé d'effet du facteur gain visuel ( $F(2,22) = 1.41, p = .26, \eta^2 = .11$ ). Le score total (représenté par la différence avant-après) était de 4,98, 5,61 et 1,24 pour, respectivement, les gains 0, 0,2 et 0,4.

Une seconde ANOVA 3 gains visuels x 2 moments de passation, à mesures répétées sur ces 2 facteurs, a ensuite été réalisée sur le score global pour déterminer l'effet de l'exposition au simulateur en fonction du gain visuel. Cette analyse a révélé un effet principal du moment de passation,  $F(1,11) = 13.02, p < .01, \eta^2 = .54$  (Avant : 5,92 ; Après : 9,87). L'interaction avec le gain visuel n'était pas significative,  $F(2,22) = 1.41, p = .26, \eta^2 = .11$ .

Des analyses identiques ont été réalisées pour chacune des trois sous-échelles. Aucun effet n'est apparu pour les sous-échelles *Nausée* et *Désorientation*. Un effet principal du moment de passation s'est par contre avéré significatif pour l'échelle de symptômes *Oculomoteurs*,  $F(1,11) = 9.51, p < .05, \eta^2 = .46$ .

Une dernière analyse comparant les scores aux échelles et visant à déterminer si les sujets déclarent significativement plus de symptômes pour une échelle en particulier n'a pas montré d'effet de la sous-échelle sur les scores au SSQ.

**Tableau 17 : Moyenne des scores total et aux sous-échelles du SSQ en fonction du gain visuel et du moment de passation.**

	Gain 0		Gain 0,2		Gain 0,4	
	Pré	Post	Pré	Post	Pré	Post
Nausées	3,18	5,56	1,59	4,77	3,18	3,18
Oculomotrice	7,58	11,37	6,31	11,37	7,58	8,84
Désorientation	4,64	12,76	4,64	11,6	5,8	8,12
Global	6,23	11,22	4,98	10,59	6,54	7,79

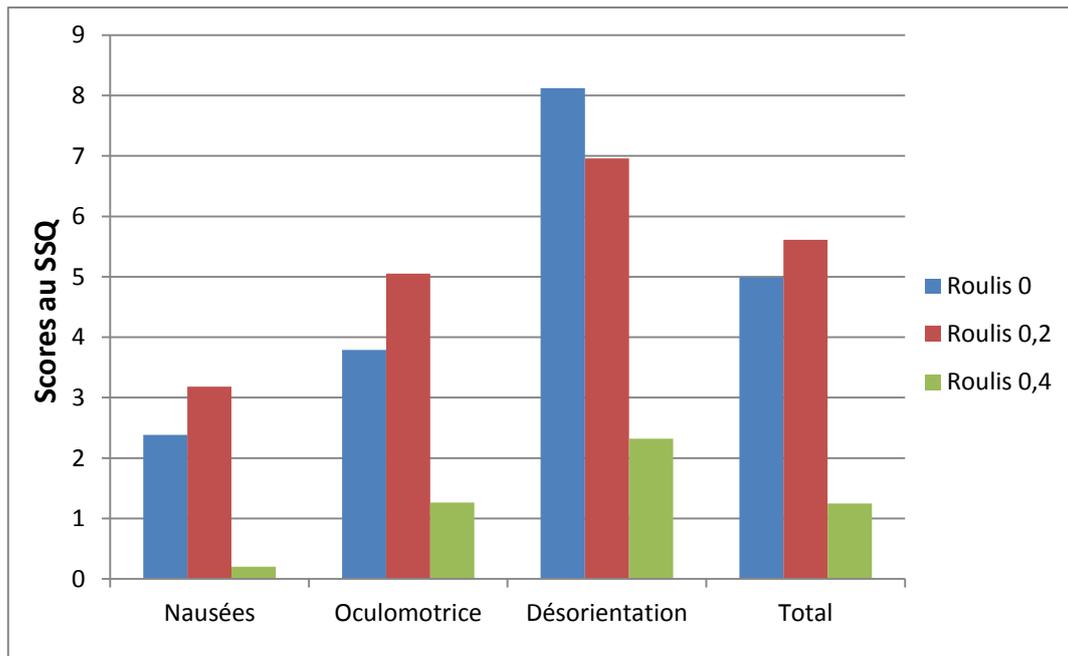


Figure 47 : Moyenne des scores obtenus aux sous-échelles et au total du SSQ (différences de score entre scores post et pré-session).

#### 7.2.2.1. Questionnaire de présence

Les résultats au questionnaire de présence (moyenne et pourcentage) sont présentés dans le Tableau 18.

Une première analyse effectuée sur le score global en fonction du gain visuel n'a pas révélé d'effet de ce facteur ( $F(2,22) = .98, p = .38, \eta^2 = .08$ ). La seconde analyse (3 Gains visuels x 6 Echelles) visant à déterminer d'éventuelles différences entre les sous-échelles en fonction du gain visuel, n'a pas révélé d'effet d'interaction entre ces deux facteurs ( $F(10,110) = 1.75, p = .07, \eta^2 = .14$ ).

Tableau 18 : Score total et scores aux sous-échelles du questionnaire de présence.

Echelles (scores max.)	Gain 0		Gain 0,2		Gain 0,4	
	Moyenne	%	Moyenne	%	Moyenne	%
Réalisme (49)	33,3	67,9	35,9	73,3	35,9	73,3
Possibilité d'Agir (28)	24	85,7	23,8	84,8	23,9	85,4
Qualité de l'Interface (21)	16,6	79	16,6	79	16,8	80,2
Possibilité d'Examiner (21)	14,7	69,8	15,2	72,2	15,8	75
Auto-évaluation (14)	12,3	88,1	12,3	87,5	11,6	82,7
Auditif (21)	14,3	68,3	13,8	65,9	14,9	71
Score total	115	74,8	118	76,3	119	77,2

En fin d'expérience, les participants ont classé, par ordre de préférence, les différentes sessions de conduite en fonction du confort/inconfort visuel ressenti. Les résultats sont présentés dans le Tableau 19. A noter que sur les 12 participants, 7 ont perçu la manipulation du roulis visuel.

**Tableau 19 : Préférence des participants en fonction du gain visuel pour l'étude 3.**

	Gain 0	Gain 0,2	Gain 0,4
1 <sup>ère</sup> position	3	3	6
2 <sup>nde</sup> position	3	8	1
3 <sup>ème</sup> position	6	1	5

### 7.2.3. Discussion

L'objectif de cette étude était d'analyser l'effet de l'introduction du roulis visuel sur les performances de conduite et les stratégies visuelles dans une tâche à dominante sensorimotrice. La manipulation du gain visuel était destinée à comparer des conditions avec et sans roulis, mais aussi des conditions de faible ou forte amplitude de roulis.

Les premières analyses ont adressé l'effet de la manipulation du gain visuel, d'une part sur le roulis visuel auquel ont été exposés les participants, et d'autre part sur les déviations subies par le point tangent. Le roulis visuel restitué dépendant des stratégies de conduite et en particulier de la vitesse de passage et de la trajectoire empruntée par le conducteur, le calcul du roulis visuel moyen et du roulis maximum délivrés par chaque condition de gain visuel non nul a confirmé l'effet de la manipulation du gain visuel sur ces variables.

Pour ce qui concerne le point tangent, cet indice visuel a été utilisé comme référence objective dans le référentiel du monde 3D, son comportement dans la scène étant connu sur la base du rayon de courbure de la trajectoire et de la position latérale du véhicule dans sa voie. En déterminant les déviations de ce point par rapport au centre de l'image, l'objectif était de quantifier la dynamique de la scène au travers des modifications subies par le point tangent avec ou sans roulis visuel. Les résultats ont montré que les positions moyenne, minimum et maximum du point tangent par rapport au centre de l'image sur l'axe horizontal étaient que peu modifiées avec l'introduction du roulis visuel. Il a par contre été montré sur l'axe vertical un effet du gain visuel sur la position moyenne, la variabilité de cette position et la position maximale du point tangent par rapport au centre de l'image. Alors que c'est traditionnellement la dynamique horizontale qui est étudiée, la dynamique verticale étant relativement faible, l'introduction du roulis visuel entraîne donc une dynamique plus importante sur l'axe vertical.

La confirmation de l'effet du gain visuel sur la dynamique de la scène soulève donc la question de l'effet de cette dynamique nouvelle sur les stratégies visuelles. Il semble important, en premier lieu, de qualifier la dynamique du regard pour la condition sans roulis visuel (gain 0). Il est apparu pour cette condition un relatif maintien de la stratégie point

tangent, c'est-à-dire que l'essentiel des fixations se situait de façon légèrement décalée de 3° sur l'axe horizontal et de 2° sur l'axe vertical. La direction du regard se positionnait donc en moyenne avec une légère anticipation sur le point tangent sur les deux axes.

Cette dynamique est-elle modifiée avec l'introduction du roulis ? Si oui, comment ? Les résultats ont montré que la manipulation du roulis visuel n'influence pas le positionnement moyen du regard sur l'axe horizontal, ce résultat s'expliquant par l'absence de différence dans la dynamique du point tangent avec le roulis. Par contre, sur l'axe vertical, la distance au point tangent augmente avec le gain visuel. Les conducteurs ont tendance à regarder plus en amont, à anticiper légèrement (décalage vers le positif avec le roulis) : 2.49° pour le gain 0.4, contre 1.8 et 1.94° pour les gains 0 et 0.2, qui ne se différencient pas significativement.

L'analyse des proportions de directions de regard selon leur distance au point tangent a permis d'affiner ce 1<sup>er</sup> résultat. Dans la lignée des résultats obtenus sur l'axe horizontal, on observe sur cet axe une quasi-superposition des courbes pour les 3 gains, un pic de directions oculaires (16%) se situant entre 1 et 2° en amont du point tangent, puis des directions fortement concentrées en anticipation. Environ 40% des directions sont concentrées entre 0 et 3°, et 40% au-delà de 3°. Sur l'axe vertical, les analyses ont révélé une interaction significative entre le gain visuel et la distance au point tangent sur les proportions de direction de regard, avec des différences significatives sur le pic de directions oculaires (classe 1-2°) entre les conditions avec et sans roulis visuel et des différences entre le gain 0 et le gain 0,4 sur les classes allant de 0° à +6° par rapport au point tangent (exceptée la classe 2-3°). Les classes allant de 0 à 3° concentrent 70% des directions de regard pour le gain 0 contre 56% pour le gain 0,4, mais les classes allant de 3 à 6° concentrent davantage de directions oculaires pour le gain 0,4, avec 12% de directions pour le gain 0 contre 24% pour le gain 0,4. Comme l'illustre la Figure 46, ces différences correspondent à une concentration plus importante de directions oculaires entre 0 et 2° pour le gain 0, et un positionnement du regard plus en anticipation pour le gain 0,4.

Quelle est alors l'origine de cette dynamique particulière des directions du regard sur l'axe vertical avec le roulis visuel ?

Avec l'introduction du roulis visuel, l'ensemble de la scène subit une rotation en roulis, sa dynamique se trouvant modifiée principalement sur l'axe vertical. Cela signifie que les variations dans le référentiel de l'image induites par le roulis sur cet axe sont d'autant plus grandes que le gain visuel est important et que les points dans la scène, tel que le point de fuite de la route par exemple, sont éloignés/excentrés du centre de rotation du roulis. Si les directions oculaires dites anticipatives se distinguent habituellement par des excentricités importantes sur l'axe des x, l'acquisition d'informations « éloignées » sur la route doit donc satisfaire aux variations induites par le roulis visuel. Les différences significatives observées entre les gains 0 et 0,4 sur les classes allant de 3 à 6°, avec des proportions de directions oculaires plus importantes pour le gain 0,4, pourraient alors illustrer une adaptation des stratégies visuelles au roulis visuel. Les stratégies se réorganiseraient donc pour acquérir de l'information sur la courbure de la route en des points marqués par une excentricité plus

importante sur l'axe vertical. Cela laisse suggérer que les zones trackées sur la chaussée seraient plus éloignées qu'en condition normale.

Pour ce qui concerne les comportements de conduite, les analyses ont mis en évidence un effet significatif du gain visuel sur l'écart latéral moyen, l'écart au centre de voie augmentant de manière significative en présence de roulis visuel (i.e., absence de différence entre les gains 0,2 et 0,4), sur la variabilité de l'écart latéral, la trajectoire empruntée étant significativement plus variable pour le gain visuel de 0,4 (absence de différence entre les gains 0 et 0,2), et sur le nombre de sorties de voie qui augmente en présence de roulis visuel (absence de différence entre les gains 0,2 et 0,4). Ces résultats illustrent donc une dégradation globale du contrôle de trajectoire avec le roulis visuel, en particulier lorsque le roulis est important (gain 0,4). Ces résultats pourraient s'expliquer soit par une forme de désorientation dans le virage ayant pour conséquence un décalage vers l'intérieur de la courbe (ce décalage ne relevant alors pas d'une stratégie de conduite visant à couper le virage), soit par une intensification de la sensation d'immersion (d'inclinaison) avec le roulis qui s'accompagnerait d'une stratégie visant à couper le virage (pouvant aller jusqu'à la sortie de route, mais les résultats du questionnaire de présence n'appuient pas cette hypothèse), soit par une perturbation des stratégies de prise d'informations visuelles. Cette dernière hypothèse s'appuierait sur le modèle de Donges (1978) identifiant deux processus principaux et fonctionnant en parallèle du contrôle de trajectoire. Un premier système serait dédié au prélèvement des informations visuelles proches (périphériques) destinées à corriger les erreurs de positionnement latéral. Le second système serait lui en charge du prélèvement des informations lointaines destinées à anticiper les courbures de la route. Si les stratégies visuelles sont « détournées » vers davantage d'anticipation du fait du roulis visuel, ces détournements sont donc susceptibles de s'effectuer au détriment du contrôle latéral par la vision périphérique. Enfin, ces résultats s'opposent à ceux de Stedmon et al. (2011) montrant que les conditions où l'horizon visuel était incliné et celles où l'horizon visuel était maintenu horizontal (sans mouvement de roulis) ont résulté en des performances de conduite similaires. Sans information sur la quantité de roulis visuel restitué sur le MotorcycleSim, il est difficile de comparer ces résultats contradictoires.

Enfin, les données subjectives n'ont pas révélé d'effet du gain visuel sur le mal du simulateur ni sur le sentiment de présence. Le classement des configurations de conduite a par contre montré que les participants se sont majoritairement prononcés pour la condition de roulis visuel le plus important, ce qui va dans le sens des données subjectives produites par Stedmon et al. (2011). Les résultats pour le gain 0,4 ont néanmoins montré que sur les 12 participants, 5 ont classé cette condition défavorablement.

### **7.3. Etude 4 : Effet du roulis visuel sur le contrôle visuel de la trajectoire et les performances de conduite sur simulateur moto à plate-forme dynamique**

Sur la base des résultats de l'expérience précédente, l'objectif de cette dernière étude était double :

- 1- Augmenter l'amplitude du roulis visuel, avec des gains de 0,5 et 1 (correspondant, respectivement, à 50 et 100% de l'inclinaison d'une moto réelle dans des conditions similaires) pour en vérifier l'impact sur les stratégies visuelles,
- 2- Introduire du roulis physique pour aborder la question de l'interaction entre roulis physique et roulis visuel.

### 7.3.1. Méthodes

#### 7.3.1.1. Participants

Dix-huit motocyclistes ont pris part à l'expérience (voir Tableau 20). Ils ont également été recrutés suite à une campagne d'information diffusée dans le journal spécialisé MotoMag ou sur le site internet du journal, avec le concours de la FFMC. Les participants devaient, pour être recrutés, posséder le permis A et conduire un minimum de 5000 km par an. Tous avaient une vision normale ou corrigée, et aucun ne souffrait de migraine, épilepsie ou du mal des transports.

**Tableau 20: Caractéristiques de l'échantillon de l'étude 4.**

	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Age	34	7,4	22	49
Permis B (an)	14	8	1	28
Km/an	13028	15269	500	60000
Permis A (an)	12	9	2	31
Km/an	11333	8410	5000	40000
Heures/semaine	6	3	2	12
Type de route fréquentée (%)				
Urbain	35	23	0	90
Péri-urbain	46	20	10	80
Rural	19	23	0	80

Huit des participants conduisaient une moto de cylindrée comprise entre 500 et 750 cm<sup>3</sup>, 2 participants une moto de 750 à 1000 cm<sup>3</sup>, et huit autres, une cylindrée supérieure à 1000 cm<sup>3</sup>. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique de l'IFSTTAR. Les participants ont été indemnisés à hauteur de 40 euros pour leur participation.

#### 7.3.1.2. Dispositif expérimental

L'expérience a été réalisée avec le même dispositif et la même base visuelle que l'expérience précédente. Le simulateur de conduite moto a par contre été utilisé dans une version dynamique, avec la configuration dite contre-braquage développée dans la tâche 1. Avec ce modèle de conduite, les participants avaient la possibilité d'engager une inclinaison avec la moto soit par le guidon, soit par des actions avec le corps sur la moto (appui repose-pieds ou

réservoir, déplacement du centre de gravité sur la moto) du fait de la présence de capteurs sur le haut des véris. A cette occasion, le gain pour le roulis physique a été fixé à 0.4.

#### *7.3.1.3. Tâche, plan et procédure expérimentale*

La tâche consistait pour les participants à parcourir deux tours du circuit, en respectant la limite de vitesse (90 km/h) et en restant sur leur voie.

Trois gains visuels différents ont été présentés aux participants: 0 (pas de roulis visuel), 0.5 (roulis visuel reproduisant 50% de l'inclinaison d'une moto réelle compte tenu de la vitesse de passage et du rayon de courbure) et 1 (roulis visuel reproduisant 100% de l'inclinaison d'une moto réelle). A noter que pour ces différents gains, le pourcentage total d'inclinaison restituée (roulis visuel + roulis physique) est donc de 40, 90 et 140 % de l'inclinaison d'une moto réelle. Comme précédemment, le roulis visuel restitué au cours de l'expérience pour les gains de 0.5 et 1 dépendait de la vitesse de passage dans chacun des virages. L'enregistrement du roulis visuel au cours de l'expérience a permis d'effectuer un contrôle de l'amplitude du roulis auquel les participants ont été exposés.

La procédure expérimentale suivie était identique à l'expérience précédente, y compris dans les questionnaires remplis par les participants. Pour la phase de familiarisation, les gains utilisés étaient de 0.25 et 0.75.

#### *7.3.1.4. Analyse des données*

Les mêmes variables dépendantes que précédemment, auxquelles le roulis physique (inclinaison de la moto) moyen et maximal a été ajouté, ont été calculées pour chaque virage. Les données de ligne droite, ainsi que les sorties de route ont été exclues des traitements.

### **7.3.2. Résultats**

#### *7.3.2.1. Effet du gain visuel sur la dynamique de la scène et du point tangent*

##### **7.3.2.1.1. Roulis visuel**

Les tests de comparaison de moyenne à un standard (Gain 0) réalisés sur le roulis visuel moyen (Tableau 21) ont révélé des différences significatives entre le gain 0 et le gain 0,5 ( $t(17) = 32.63, p < .0001$ ) et entre le gain 0 et le gain 1 ( $t(17) = 38.91, p < .0001$ ). Le test  $t$  réalisé entre les gains 0.5 et 1 a également révélé une différence significative sur le roulis visuel moyen ( $t(17) = 27.63, p < .0001$ ).

Ces mêmes tests ont été réalisés sur le roulis visuel maximum (Tableau 21) et révélé des différences significatives entre les trois gains ( $ts(17) > 25, ps < .0001$ ).

##### **7.3.2.1.1. Position du point tangent par rapport au centre de l'image**

Les ANOVA (x 3 gains visuels), à mesures répétées, sur la distance du point tangent au centre de l'image sur l'axe horizontal ont révélé un effet significatif du gain visuel sur la distance

**Tableau 21 : Roulis visuel moyen et maximum (et écart-type), en degré, en fonction du gain visuel.**

	<b>Roulis visuel</b>			
	<b>Moyen</b>		<b>Max</b>	
	<b>M</b>	<b>ET</b>	<b>M</b>	<b>ET</b>
Gain 0	0,00	0,00	0,00	0,00
Gain 0,5	7,72	2,19	10,50	3,09
Gain 1	14,66	3,93	19,63	5,25

moyenne,  $F(2,34) = 12.01$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .41$ , la distance du point tangent au centre de l'image augmentant avec le gain visuel (différence significative entre les conditions avec et la condition sans roulis visuel), et la distance maximum,  $F(2,34) = 3.67$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .18$ , cette distance se différenciant des deux autres gains pour le gain 1 (Tableau 22).

L'ANOVA (x 3 gains visuels) à mesures répétées sur la distance du point tangent au centre de l'image sur l'axe vertical a révélé un effet du gain visuel sur la position moyenne ( $F(2,34) = 380.42$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta^2 = .96$ ), la variabilité de cette position ( $F(2,34) = 78.42$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta^2 = .82$ ), la position minimale ( $F(2,34) = 4.55$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .21$ ) et la position maximale ( $F(2,34) = 299.38$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta^2 = .95$ ) du point tangent par rapport au centre de l'image (Tableau 22), les test post-hoc ayant montré des différences significatives entre les trois gains pour chacune de ces variables. Ces résultats confirment ainsi que la position moyenne du point tangent dans le référentiel de l'image est modifiée avec l'introduction du roulis visuel et que la variabilité de cette position ainsi que l'amplitude des mouvements subis par le point tangent augmentent.

**Tableau 22 : Position moyenne (et écart-type), minimum et maximum du point tangent par rapport au centre de l'image pour l'axe horizontal et vertical en fonction du gain visuel.**

	<b>PT/centre image (degré)</b>			
	<b>Axe horizontal</b>			
	<b>M</b>	<b>ET</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Gain 0	6,21	1,42	3,61	8,44
Gain 0,5	6,47	1,41	3,78	8,68
Gain 1	6,60	1,43	3,57	8,87
<b>Axe vertical</b>				
	<b>M</b>	<b>ET</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Gain 0	-0,44	0,64	-2,51	0,39
Gain 0,5	0,44	0,91	-2,16	1,74
Gain 1	1,18	1,18	-2,04	3,02

### 7.3.2.2. Comportements oculaires

#### 7.3.2.2.1. Distance au point tangent des directions de regard

L'ANOVA sur la distance au point tangent des directions de regard n'a pas révélé d'effet significatif du gain visuel sur l'axe horizontal. Le regard était globalement dirigé autour de 1° au-delà du point tangent quel que soit le gain visuel (Tableau 23).

Sur l'axe vertical (Tableau 23), l'ANOVA a révélé un effet significatif du gain visuel sur la distance moyenne au point tangent ( $F(2,34) = 5.58, p < .01, \eta^2 = .25$ ). Le test post-hoc a montré des différences significatives entre le gain 1 et les deux autres gains.

**Tableau 23 : Distance (moyenne et écart-type) au point tangent des directions de regard sur l'axe horizontal et vertical en fonction du gain visuel.**

	Distance au PT (degré)			
	Axe horizontal		Axe vertical	
	M	ET	M	ET
Gain 0	1,49	1,91	1,41	0,95
Gain 0,5	1,21	1,84	1,38	1,13
Gain 1	1,09	1,91	1,94	1,39

#### 7.3.2.2.2. Proportion des directions de regard en fonction de la distance au point tangent

Sur l'axe des x comme des y, une ANOVA 3 Gains visuels x 32 Distances au point tangent (de -15 à +15°, par pas de 1°) à mesures répétées a été réalisée.

Sur l'axe horizontal, l'analyse n'a pas révélé d'effet du gain visuel sur les proportions de directions de regard. Seul un effet de la distance est apparu ( $F(31,527) = 179.44, p < .0001, \eta^2 = .91$ ), avec des différences significatives (deux à deux) entre les classes comprises entre -4 et +4°. La Figure 48 illustre la similarité de la distribution des directions oculaires en fonction de la distance au point tangent entre les trois conditions de gain visuel. Elle montre, d'autre part, une forte concentration des directions oculaires autour du point tangent (65% des directions comprises entre -2 et +2°), avec un pic (21%) se situant entre 0 et 1° en amont du point tangent. Elle illustre également les résultats de la distance moyenne au point tangent, les directions oculaires sur l'axe horizontal se situant en moyenne 1° au-delà du point tangent (décalage de la distribution vers la droite) quel que soit le gain visuel.

Sur l'axe vertical, l'analyse a révélé un effet principal de la distance ( $F(31,527) = 232.74, p < .0001, \eta^2 = .91$ ) ainsi qu'une interaction entre le gain visuel et la distance entre direction du regard et point tangent ( $F(62,1054) = 5.53, p < .0001, \eta^2 = .26$ ). Le test post-hoc sur l'effet de la distance a mis en évidence des différences deux-à-deux entre les classes allant de -3° à +6° par rapport au point tangent. L'analyse a posteriori pour l'interaction entre le gain visuel et la distance (Figure 49) a montré :

- entre les gains 0 et 0,5, des différences significatives entre les classes [-2 ; -1°] avec davantage de directions oculaires pour le gain 0.5 (3.56 et 6.07% pour les gains 0 et 0.5), et [0 ; +1°] et [1 ; 2°] avec davantage de directions de regard pour le gain 0 (31.1 et 27.6% pour le gain 0 et 28.7 et 24.9% pour le gain 0.5), la classe [0 ; +1°] correspondant au pic de proportion ;
- entre les gains 0 et 1, des différences significatives entre les classes allant de -1° à +5° par rapport au point tangent, avec des proportions supérieures pour le gain 0 pour les classes allant de -1 à +2° (pour un total de 73.6 et 54.5% des directions oculaires pour les gains 0 et 1), mais des directions oculaires en plus grand nombre pour le gain 1 pour les classes allant de 2 à 5° (pour un total de 20.3 et 34.3% pour les gains 0 et 1). Comme l'illustre la Figure 49, ces différences significatives correspondent à un positionnement du regard plus en anticipation pour le gain 1 ;
- entre les gains 0,5 et 1, des directions oculaires significativement plus nombreuses entre -2 et +1° pour le gain 0,5, une absence de différence pour la classe [1 ; 2°], et des directions plus nombreuses pour le gain 1 pour les classes allant de 2 à 5°.

#### 7.3.2.2.3. Dispersion des directions de regard (référées au centre de l'image)

La dispersion moyenne des directions de regard référencées au centre de l'image donne des indications sur la variabilité des directions oculaires dans le plan de l'image et donc de l'environnement 3D, et non plus spécifiquement rapportées au point tangent.

L'ANOVA réalisée n'a pas révélé d'effet significatif du gain visuel pour l'axe horizontal. Pour l'axe vertical, l'analyse a mis en évidence un effet du gain visuel sur la dispersion ( $F(2,34) = 68.73, p < .0001, \eta^2 = .80$ ), la variabilité verticale des directions de regard augmentant significativement avec le roulis visuel (Tableau 24).

**Tableau 24 : Dispersion des directions de regard en fonction du gain visuel.**

	Dispersion moyenne (degré)	
	(non référée au point tangent)	
	Axe horizontal	Axe vertical
Gain 0	2,30	0,64
Gain 0,2	2,15	0,84
Gain 0,4	2,21	1,11

#### 7.3.2.1. Comportements de conduite

Les ANOVAs réalisées sur la vitesse moyenne, la variabilité de l'écart latéral et le nombre d'inversion guidon n'ont pas révélé d'effet du gain visuel (Tableau 25).

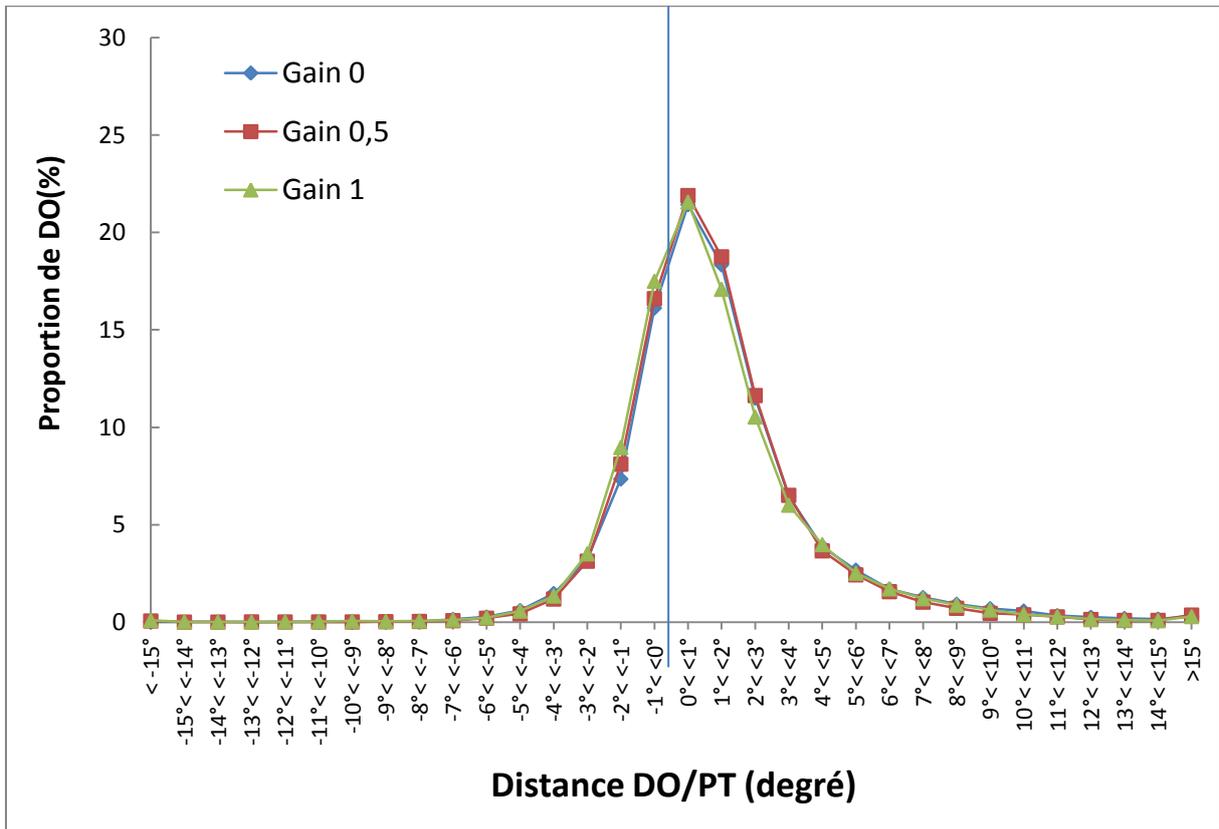


Figure 48 : Proportion de directions de regard sur l'axe horizontal en fonction du gain visuel et de la distance (en degré) au point tangent.

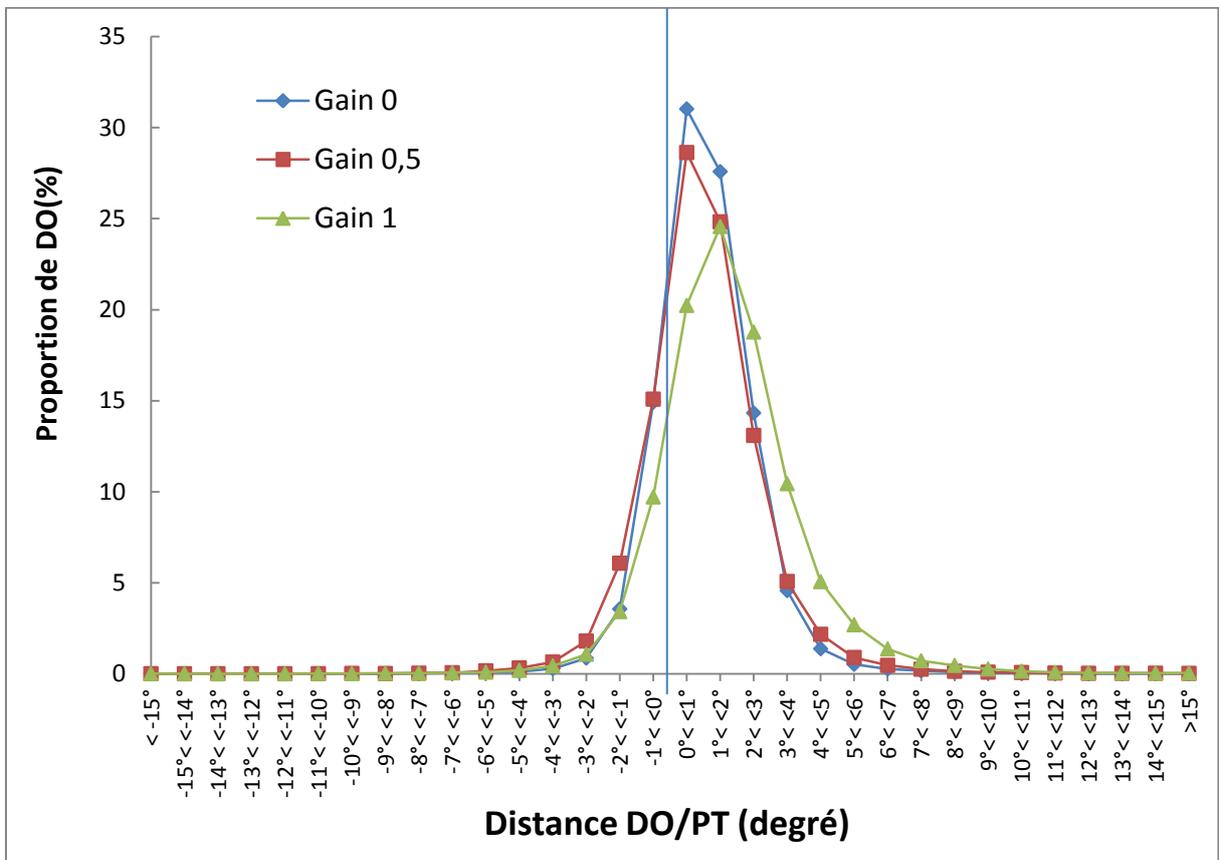


Figure 49 : Proportion de directions de regard sur l'axe vertical en fonction du gain visuel et de la distance (en degré) au point tangent.

Les analyses ont par contre mis en évidence un effet du gain visuel sur l'écart latéral au centre de voie,  $F(2,34) = 3.87$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .19$ , avec une déviation au centre de la voie en direction du bord intérieur du virage plus prononcée pour le gain 1 comparativement aux deux autres, ainsi qu'un effet sur le nombre de sorties de voie,  $F(2,34) = 4.45$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .21$ , provenant d'un nombre de sorties plus important pour le gain 1 (Tableau 25).

**Tableau 25 : Moyenne de la vitesse, de l'écart latéral au centre de voie, de la variabilité de cet écart et nombre d'inversion guidon et de sorties de voie en fonction du gain visuel.**

	Vitesse (km/h)	Ecart latéral (cm / centre de voie)	Variabilité de l'écart latéral (cm)	Nombre d'inversion guidon	Nombre de sorties de voie
Gain 0	95,8	38,3	43,00	100,31	39
Gain 0,5	97,0	39,5	42,44	94,33	44
Gain 1	94,8	46,4	42,63	90,46	58

L'ANOVA réalisée sur le roulis physique moyen (Tableau 26) n'a pas révélé d'effet du gain visuel. L'analyse pour le roulis physique maximum a par contre révélé un effet du gain,  $F(2,34) = 5.14$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .23$ , avec une réduction du roulis physique entre le gain 1 et les deux autres gains qui ne se différençaient pas.

**Tableau 26 : Roulis physique moyen et maximum (et écart-type), en degré, en fonction du gain visuel.**

	Roulis physique			
	Moyen		Max	
	M	ET	M	ET
Gain 0	6,01	1,71	8,54	2,68
Gain 0,5	6,18	1,75	8,40	2,47
Gain 1	5,87	1,57	7,85	2,10

### 7.3.2.2. Questionnaire du mal du simulateur

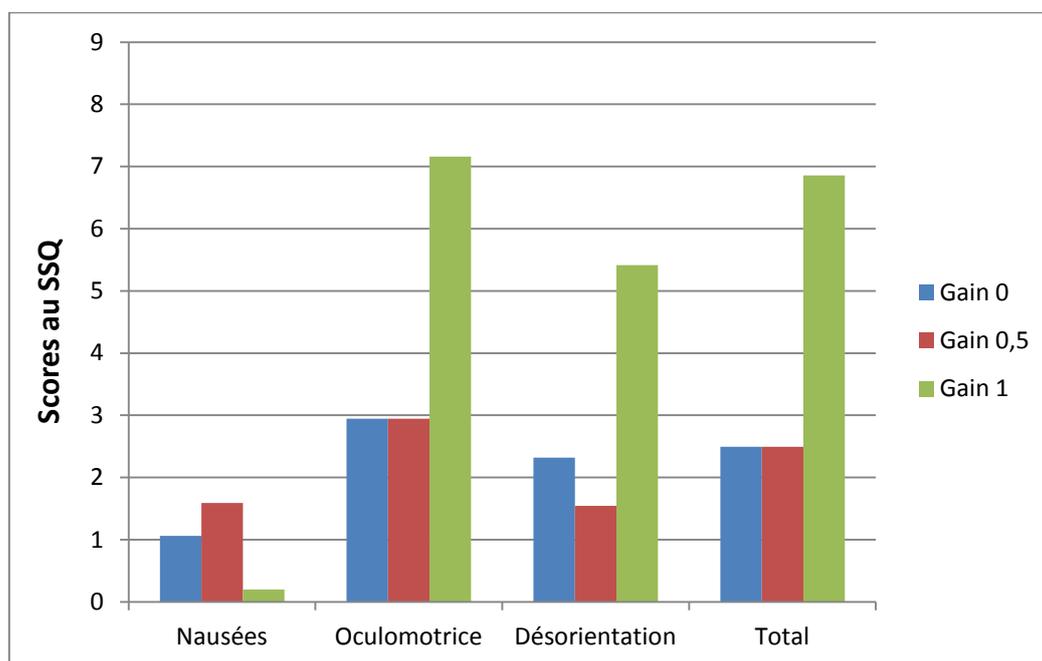
Les résultats au SSQ sont présentés dans le Tableau 26 et illustrés en Figure 50.

L'ANOVA réalisée sur le score global en fonction du gain visuel n'a pas révélé d'effet du facteur gain visuel ( $F(2,34) = 2.01$ ,  $p = .15$ ,  $\eta^2 = .15$ ). Le score total (représenté par la différence avant-après) était de 2,5, 2,5 et 6,8 pour, respectivement, le gain 0, 0,5 et 1.

Une seconde ANOVA 3 gains visuels x 3 sous-échelles, à mesures répétées sur ces 2 facteurs, a ensuite été réalisée sur le score global pour déterminer d'éventuelles différences selon la sous-échelle en fonction du gain visuel. Cette analyse n'a révélé aucun effet principal ou d'interaction.

**Tableau 27 : Score global et scores aux sous-échelles du SSQ en fonction du gain visuel et du moment de passation.**

	Gain 0		Gain 0,5		Gain 1	
	Pré	Post	Pré	Post	Pré	Post
Nausées	3,71	4,77	4,77	6,36	2,65	7,42
Oculomotrice	9,26	12,21	8,00	10,95	5,90	13,05
Désorientation	6,96	9,28	4,64	6,19	3,87	9,28
Global	7,90	10,39	7,06	9,56	4,99	11,84



**Figure 50 : Moyenne des scores obtenus aux sous-échelles et au total du SSQ (différences entre scores post et pré-session).**

### 7.3.2.3. Questionnaire de présence

Les résultats au questionnaire de présence (moyenne et pourcentage) sont présentés dans le Tableau 27.

Une première analyse effectuée sur le score global en fonction du gain visuel n'a pas révélé d'effet de ce facteur ( $F(2,34) = 1.65, p = .21, \eta^2 = .09$ ). La seconde analyse (3 Gains visuels x 6 Echelles) visant à déterminer d'éventuelles différences entre les sous-échelles en fonction du gain visuel, n'a pas révélé d'effet d'interaction entre ces deux facteurs ( $F(10,170) = 1.03, p = .42, \eta^2 = .06$ ).

**Tableau 28 : Score total et scores aux sous-échelles du questionnaire de présence.**

Echelles (scores max.)	Gain 0		Gain 0,5		Gain 1	
	Moyenne	%	Moyenne	%	Moyenne	%
Réalisme (49)	34,1	69,6	35,8	73,0	33,9	69,3
Possibilité d'Agir (28)	21,4	76,4	22,3	79,6	21,3	76,2
Qualité de l'Interface (21)	15,6	74,3	15,6	74,1	15,2	72,5
Possibilité d'Examiner (21)	13,8	65,6	14,2	67,5	13,8	65,6
Auto-évaluation (14)	10,4	74,2	11,1	79,4	10,3	73,8
Auditif (21)	13,4	63,8	13,3	63,5	13,7	65,3
Score total	108,7	70,6	112,2	72,9	108,3	70,3

En fin d'expérience, les participants ont classé, par ordre de préférence, les différentes sessions de conduite en fonction du confort/inconfort visuel ressenti. Les résultats sont présentés dans le Tableau 28. A noter que sur les 18 participants, 5 ont perçu la manipulation du roulis visuel.

**Tableau 29 : Préférence des participants en fonction du gain visuel pour l'étude 4.**

	Gain 0	Gain 0,5	Gain 1
1 <sup>ère</sup> position	2	10	6
2 <sup>nde</sup> position	11	5	2
3 <sup>ème</sup> position	5	3	10

### 7.3.3. Discussion

L'objectif de cette dernière étude était 1) d'amplifier le roulis visuel pour en vérifier l'impact sur les stratégies visuelles, en conservant une condition contrôle (gain 0), et 2) d'introduire du roulis physique (inclinaison de la moto) pour aborder la question de son interaction avec le roulis visuel.

Les analyses réalisées sur le roulis visuel et la déviation du point tangent au centre de l'image ont confirmé l'effet du gain visuel sur la dynamique de la scène et du point tangent. Contrairement à l'expérience précédente, les résultats ont mis en évidence des différences significatives entre les conditions avec et la condition sans roulis visuel sur la distance moyenne et la distance maximale du point tangent au centre de l'image sur l'axe horizontal. D'autre part, il est à noter que le roulis visuel pour le gain 0.4 de l'étude 3 (Moyenne = 8,57° ; Max = 10,80°) excède le roulis visuel pour le gain 0.5 de l'étude 4 (Moyenne = 7,72° ; Max = 10,50°). Ces angles de rotation en roulis sont à rapprocher des données obtenues pour l'écart latéral au centre de voie (gain 0.4 : 66 cm ; gain 0.5 : 40 cm), le roulis visuel dépendant de la vitesse de passage et de la courbure de la trajectoire. Plus les participants coupent le virage,

plus la courbure de leur trajectoire est importante, entraînant par conséquent une augmentation du roulis visuel. Dans la mesure où pour le gain 0.4 les participants ont davantage coupé le virage, il en résulte un roulis visuel plus important. Une seconde explication peut tenir à l'introduction, dans la présente étude, d'un roulis physique en complément du roulis visuel. Du fait d'une inclinaison physique dans le virage, les participants sont susceptibles d'avoir ressenti l'inclinaison de façon plus prononcée, modifiant ainsi leur trajectoire et par conséquent le roulis visuel.

Les effets de la dynamique de la scène sur les stratégies visuelles affichent un pattern similaire à celui de l'étude 3. Il est donc intéressant de noter que l'amplification du roulis visuel vers des valeurs plus importantes (voire incohérentes du point de la physique, le taux de roulis global avec le gain 1 étant de 140%) ne désorganisent pas totalement les stratégies visuelles. Les résultats ont ainsi mis en évidence une absence de différence entre les gains visuels sur l'axe horizontal malgré les variations de position subies par le point tangent sous l'effet du facteur gain visuel, et un décalage vers davantage d'anticipation sur l'axe vertical pour le gain le plus important. L'absence de différence sur l'axe horizontal est importante à relever puisqu'elle suggère que les stratégies visuelles restent ancrées sur le point tangent malgré l'effet du gain visuel sur la dynamique de cet indice visuel.

Comparativement à l'expérience précédente, on observe, sur l'axe horizontal, un recentrage des directions oculaires vers le point tangent (disparition du décalage vers la droite de la distribution), comme l'attestent la distance moyenne des directions oculaires au point tangent (autour de 3° dans l'étude 3, autour de 1,5° dans cette étude) et le pic de directions de regard (16% et situées entre 1 et 2° en amont du point tangent pour l'étude 3, 21% situées entre 0 et 1° pour la présente étude). Sur l'axe vertical, on observe également un recentrage des directions oculaires vers le point tangent, uniquement pour les gains 0 et 0.5, le pic de directions oculaires se situant entre 0 et 1° et la distance moyenne au point tangent se réduisant.

Les comportements de conduite et les données subjectives permettent au final de qualifier les modifications induites par la manipulation du gain visuel. Il est en effet apparu des différences entre les gains, principalement attribuables au roulis le plus important. Ont été signalés par les analyses statistiques une déviation au centre de la voie et un nombre de sorties de voie plus important pour le gain 1. En parallèle, les participants ont préféré le gain intermédiaire par comparaison aux autres conditions, et une majorité d'entre eux ont classé la condition de roulis visuel élevé très défavorablement. Prises conjointement, ces données suggèrent donc que le gain visuel le plus important entraîne des perturbations de l'activité de conduite accompagnées d'un jugement négatif. Il est enfin intéressant de noter que le gain visuel le plus plébiscité correspond à la configuration de restitution (gain visuel de 0.5 qui, additionné au gain physique de 0.4, fournit une inclinaison totale de 90% de l'inclinaison d'une moto réelle dans des conditions de vitesse et de trajectoire similaire) s'approchant au mieux d'un gain total de 1 (correspondant donc à la restitution de 100% de l'inclinaison d'une moto).

## 8. Discussion générale & conclusion

### *La question du modèle de conduite*

La revue de littérature sur la simulation de conduite moto laisse clairement apparaître le balbutiement des travaux sur ce sujet. Un spectre large de raisons peut être évoqué :

- absence de capitalisation des connaissances, car les études sont encore en nombre limité,
- absence d'homogénéité dans les architectures mécanique et logicielle des différents simulateurs en exploitation : différences sur le nombre de degrés de liberté, différences sur l'amplitude et puissance des actionneurs, différences sur les modalités d'interaction avec le dispositif de réalité virtuelle (présence ou non de capteurs complémentaires permettant de prendre en compte les actions du conducteur sur la moto, tels que les pressions exercés sur les repose-pieds, sur le réservoir ou les mouvements du haut du corps),
- existence d'une controverse sur la restitution de mouvement avec les simulateurs à plateforme dynamique, provenant d'interrogations sur la nature même de la restitution de mouvement physique - maintien de l'inclinaison dans le virage versus inclinaison uniquement pendant les phases transitoires - auxquelles s'ajoute la question de la restitution visuelle, une modalité « projection sur écran » fournissant aux conducteurs des indices objectifs de l'inclinaison (et donc, faut-il recourir aux casques de réalité virtuelle, avec tous les effets néfastes auxquels ils sont associés),
- absence de connaissances fines de l'activité de conduite moto du fait de l'absence d'outils adaptés.

A partir du constat de l'utilisation majoritaire dans la littérature d'un modèle de conduite simplifié (conduite en braquage simple, pas d'inclinaison de la moto, illusion d'inclinaison via le roulis visuel, pas de prise en compte des actions du conducteur autres que par les leviers classiques de contrôle de la direction et de la vitesse), notre démarche s'est appuyée sur une approche comparative entre ce modèle et les différents modèles mis au point exploitant le caractère dynamique du simulateur IFSTTAR. Les résultats produits par les différentes études réalisées dans ce projet montrent des résultats contradictoires mais encourageants entre les mesures objectives et subjectives entreprises. D'une façon générale, nous pouvons conclure que le modèle dynamique utilisé (contre-braquage, restitution de l'inclinaison par le roulis physique et le roulis visuel, prise en compte des actions du conducteur sur le corps de la moto par l'intermédiaire des capteurs d'effort) entraîne des difficultés dans le contrôle de trajectoire (variabilité de la trajectoire et nombre d'inversion guidon plus importants) mais des évaluations positives de la part des participants, en particulier sur une dimension de réalisme par rapport à une moto réelle. Suite aux échanges informels avec les participants, il est ressorti que ces évaluations positives provenaient essentiellement 1) du respect du principe de contre-braquage spécifique à la conduite d'un deux-roues, et 2) à l'inclinaison physique de la moto virtuelle. Il faut ajouter ici que ces deux mêmes modèles ont été comparés dans une étude complémentaire adressant la question de la charge mentale induite par la configuration de conduite (Benedetto et al., en révision). Les évaluations menées ont révélé des orientations similaires.

Suite aux différentes études réalisées, plusieurs sources d'amélioration du modèle de conduite en contre-braquage ont été identifiées :

- amélioration du retour d'effort guidon (manque de couple dans les virages),
- amélioration de la sensibilité des capteurs d'effort (meilleure prise en compte du poids du conducteur),
- évaluation de différents gains pour le roulis physique (et de son couplage avec le roulis visuel),
- comparaison entre une stratégie de commande reposant sur le maintien de l'inclinaison dans le virage versus inclinaison uniquement pendant les phases transitoires.

### *La question du roulis visuel*

Nous avons documenté, à partir de la revue de littérature, qu'une tendance lourde existe quant à l'introduction d'un roulis visuel pour assurer l'illusion d'inclinaison sur simulateur moto. Le roulis visuel permet en effet de compenser les limites du roulis physique (puisqu'il s'accompagne d'une potentielle sensation de chute au-delà d'un certain seuil), de même qu'il permet d'aller dans le sens des principes physiques de l'inclinaison en moto en procédant à un rapprochement entre le conducteur et le sol. L'introduction de ce roulis visuel participerait donc à la fidélité physique de la simulation (Stedmon, 2011).

Cependant, ce consensus s'est essentiellement établi à partir de données subjectives, les participants devant juger du réalisme de l'inclinaison ou simplement déclarer leur préférence pour une condition avec ou sans roulis visuel. Nous avons, pour notre part, avancé que l'introduction du roulis visuel modifie inmanquablement la dynamique de la scène visuelle. D'un côté, son introduction entraîne une rotation dans le flux optique. De l'autre, elle perturbe les référentiels spatiaux. Se pose alors la question de ses effets sur la dynamique du regard et sur les stratégies visuelles dans le référentiel 3D de l'environnement.

Les résultats des études 3 et 4 ont révélé un effet du roulis visuel sur les stratégies visuelles et les comportements de conduite, principalement lorsque le roulis est important. Ces résultats militent donc pour l'introduction d'un roulis visuel « raisonnable ». Les différents gains testés suggèrent sur la question de son amplitude de recourir à un gain visuel qui n'excéderait pas 0.5 pour un simulateur à plate-forme dynamique (soit 50% de l'inclinaison d'une moto réelle) et serait inférieur à 0.4 pour un simulateur statique.

Ces résultats posent, en retour, la question de la pertinence des mesures subjectives et de l'absolue nécessité de s'appuyer sur des mesures objectives pour évaluer les caractéristiques immersives et interactives des dispositifs de réalité virtuelle. Si ces deux types de mesures concordent lorsqu'il s'agit de qualifier des conditions extrêmes (i.e., gain 1), des divergences apparaissent pour des conditions plus nuancées (i.e., gain 0.4). Les mesures de la crédibilité subjective de l'expérience semblent donc être de bonnes cibles s'il s'agit d'évaluer le caractère immersif de l'environnement et la fidélité physique de la simulation, alors que l'étude du comportement du sujet du point de vue de l'identification de couplages sensori-moteurs naturels est clairement une voie à emprunter pour évaluer la fidélité fonctionnelle des

dispositifs de réalité virtuelle. Le choix du type de mesures à adopter doit néanmoins être guidé par l'emploi auquel est destiné le dispositif de simulation.

### *Une spécificité de la tâche ?*

Ce projet était circonscrit à la prise de virage. Si le choix de cette tâche de conduite particulière était guidé par sa pertinence pour étudier les effets du modèle de conduite et du roulis visuel sur le contrôle de trajectoire et les stratégies visuelles, nos conclusions doivent immanquablement être nuancées puisque probablement spécifiques à la tâche et à l'environnement utilisés.

La qualification et l'évaluation du(des) domaine(s) de validité du simulateur de conduite moto de l'IFSTTAR doivent donc se poursuivre en adressant d'autres processus (e.g., charge mentale ; Benedetto et al., en révision) et d'autres situations/contextes de conduite.

## 9. Bibliographie

- Allen, R.W., Park, G., Cook, M., & Fiorentino, D. (2007). The effect of driving simulator fidelity on training effectiveness. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference, North America*, pp. 1-15.
- Belmonte, J-P. (2001). *Le contrebraquage en conduite motocycliste*. Rapport technique, Fondation Promocycle, 42.
- Benedetto, S., Lobjois, R., Faure, V., Dang, N-T., Pedrotti, M., Caro, S. (en révision). A comparison of immersive and interactive motorcycle simulator configurations. Manuscript submitted for publication to Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior.
- Bonte, L., Espié, S., & Mathieu, P. (à paraître). Les différents comportements des motocyclistes : Application en simulation de trafic. *Génie Logiciel*.
- Burkhardt, J-M., Bardy, B., & Lourdeaux, D. (2003). Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des Environnements Virtuels. *Psychologie Française*, 48, 35-42.
- Chiyoda, S., Yoshimoto, K., & Kawasaki, D. (2000). Development of a motorcycle simulator using parallel manipulator and head mounted display. In *Proceedings of Driving Simulation Conference*, Paris, France.
- Clarke, D. D., Ward, P., Bartle, C., & Truman, W. (2007). The role of motorcyclist and other driver behaviour in two types of serious accident in the UK. *Accident Analysis and Prevention*, 39, 974-981.
- Cossalter, V. (2002). *Motorcycle dynamics*. Race Dynamics, Greendale, WI.
- Cossalter, V., Doria, A., & Lot, R. (2004). Development and validation of a motorcycle riding simulator. In *FISITA World Automotive Congress*, Barcelona, Espagne.
- Cossalter, V., Lot, R., & Rota, S. (2010). Objective and subjective evaluation of advanced motorcycle riding simulator. *European Transport Research Review*, 2, 223-233.
- 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.
- Crundall, E., Crundall, D., & Stedmon, A. W. (2012). Negotiating left-hand and right-hand bends: A motorcycle simulator study to investigate experiential and behaviour differences across rider groups. *PLoS ONE*, 7(1), e29978.
- Crundall, E., Stedmon, A.W., Saikayasit, R., & Crundall, D. (2013). A simulator study for investigating how motorcyclists approach side-road hazards. *Accident Analysis & Prevention*, 51, 42-50.
- Dagdelen, M., Reymond, G., Kemeny, A., Bordier, M., & Maïzi, N. (2004). MPC based motion cueing algorithm: Development and application to the ULTIMATE driving simulator. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, September 2004.

- Dagonneau, V. (2012). Etude des liens entre immersion et présence pour la mise au point d'un simulateur de conduite de deux-roues motorisés. Thèse de doctorat, Université Paris Sud.
- Deborne, R., Barthou, A., Toffin, D., Reymond, G., & Kemeny, A. (2008). Simulation study of driver stress and performance to an unexpected steering critical event. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. Monaco, January 31 – February 1st.
- Délégation Interministérielle de Sécurité Routière – DISR (2008). *Gisements de sécurité routière : les deux-roues motorisés*. La Documentation Française, Paris.
- Di Stasi, L., Álvarez-Valbuena, V., Cañas, J. J., Maldonado, A., Catena, A., Antolí, A., & Candido, A. (2009). Risk behaviour and mental workload: Multimodal assessment techniques applied to motorbike riding simulation. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12, 361-370.
- Di Stasi, L. L., Contreras, D., Cándido, A., Cañas, J. J., & Catena, A. (2011). Behavioral and eye-movement measures to track improvements in driving skills of vulnerable road users: First-time motorcycle riders. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14, 26-35.
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behaviour. *Human Factors*, 20, 691-707.
- Engström, J., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F*, 8, 97-120.
- Fajen, B.R. (2005). Calibration, information, and control strategies for braking to avoid a collision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 31(3), 480-501.
- Fuchs, P., & Moreau, G. (2003). *Le traité de réalité virtuelle* (2<sup>nde</sup> édition). Paris : Ecole des Mines de Paris.
- Groen, E.L., & Bles, W. (2004). How to use body tilt for the simulation of linear self motion. *Journal of Vestibular Research*, 14(5), 375-85.
- Held, R., & Durlach, N. (1992). Telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 109-112.
- Hosking, S.G., Liu, C.C., & Bayly, M. (2010). The visual search patterns and hazard responses of experienced and inexperienced motorcycle riders. *Accident Analysis and Prevention*, 42(1), 196–202.
- Hurt, H.H., Ouellet, J.V., & Thom, D.R. (1981). Motorcycle Accident Cause Factors and Identification of Countermeasures, Volume 1: Technical Report, Traffic Safety Center, University of Southern California, Los Angeles, California 90007, Contract No. DOT HS-5-01160.
- Huth, V., Biral, F., Martín, O., & Lot, R. (2012). Comparison of two warning concepts of an intelligent Curve Warning system for motorcyclists in a simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 44(1), 118-125.
- IJsselsteijn, W. (2004). Presence in depth. Ph.D. Thesis. Eindhoven University of Technology.

- Jamson, A. H., & Merat, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behavior: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transportation Research Part F*, 8, 79-96.
- Kageyama, I., & Tagami, N. (2002). Development of a riding simulator for two-wheeled vehicles. *Journal of the Society of Automotive Engineers*, 23:347-352.
- Kandil, F.I., Rotter, A., & Lappe, M. (2009). Driving is smoother and more stable when using the tangent point. *Journal of Vision*, 9(1), 1-11.
- Katayama, T. (1996). A simulation model for riders control behavior. *Journal of the Society of Automotive Engineers*, 961.
- Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 31-376.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). A simulator sickness questionnaire (SSQ): A new method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.
- Laarni, J., Ravaja, N., & Saari, T. (2003). Using eye tracking and psychophysiological methods to study spatial presence. In *Proceedings of the 6th International Workshop on Presence*, Aalborg, Denmark.
- Lajunen, T., & Räsänen, M. (2004). Can social psychological models be used to promote bicycle helmet use among teenagers? A comparison of the health belief model, theory of planned behaviour and the locus of control. *Journal of Safety Research*, 35, 115-123.
- Land, M.F., & Furneaux, S. (1997). The knowledge base of the oculomotor system. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B Biological Science*, 352 (1358), 1231-1239.
- Land, M.F., & Lee, D.N. (1994). Where we look when we steer. *Nature*, 369, 742-744.
- Land, M.F., & Tatler, B.W. (2001). Steering with the head, the visual strategy of a racing driver. *Current Biology*, 11, 1215-1220.
- Lobjois, R., & Cavallo, V. (2007). Age-related differences in street-crossing decisions: The effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task. *Accident Analysis & Prevention*, 39(5), 934-943.
- Lobjois, R., & Cavallo, V. (2009). The effects of aging on street-crossing behavior : From estimation to actual crossing. *Accident Analysis & Prevention*.
- Liu, C.C., Hosking, S.G., & Lenné, M.G. (2009). Hazard perception abilities of experienced and novice motorcyclists: An interactive simulator experiment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12, 325-334.
- McLean, J.R., & Hoffmann, E.R. (1975).Steering reversals as a measure of driver performance and steering task difficulty. *Human Factors*, 17, 248-256.
- Mannering, F.L., & Grodsky, L.L. (1995). Statistical analysis of motorcyclists' perceived accident risk. *Accident Analysis and Prevention*, 27, 21-31.
- Mars, F. (2008). Driving around bends with manipulated eye-steering coordination. *Journal of Vision*, 8(11), 1-11.

- Meijaard, J., Papadopoulos, J.M., Ruina, A., & Schwab, A.L. (2007). Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463(2084):1955–1982.
- Mestre, D.R., & Fuchs, P. (2006). Immersion et Présence. In P. Fuchs et G. Moreau (Eds.), *Le Traité de la Réalité Virtuelle*, 3<sup>ème</sup> Edition (pp. 309-338). Paris : Ecole des Mines de Paris.
- Morice, A.H.P, Siegler, I.A., & Bardy, B.G. (2008) Action-perception patterns in virtual ball-bouncing: Combating system latency and tracking functional validity. *Journal of Neuroscience Methods*, 169(1), 255-266.
- Moroney, W.F., & Moroney, B.W. (1998). Simulation. In D.J. Garland, J.A. Wise, and V.D. Hopkins, (Eds.), *Human factors in aviation systems* (pp. 358–388). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates I.
- Motorcycle Safety Foundation (2004). *The Motorcycle Safety Foundation's Guide To Motorcycling Excellence: Skills, Knowledge, and Strategies For Riding Right*. Osceola (WI) : Motorbooks International.
- 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.
- Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière – ONISR (2007). *Les motocyclettes et la sécurité routière en France en 2005*. La Documentation Française, Paris.
- Prothero, J.D., Parker, D.E., Furness, T.A., & Wells, M.J. (1995). Towards a robust, quantitative measure for presence. In *Proceedings of the International Conference on Experimental Analysis and Measurement of Situation Awareness*. Embry-Riddle Aeronautical University, Dayton Beach, Florida.
- Reymond, G., & Kemeny, A. (2000). Motion cueing in the Renault driving simulator. *Vehicle System Dynamics*, 34, 249-259.
- Reymond, G., Droulez, J., & Kemeny, A. (2002). Visuo-vestibular perception of self-motion modeled as a dynamic optimization process. *Biological Cybernetic*, 87(4), 301-14.
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (2001). Role of lateral acceleration in driving: experiments on a real vehicle and a driving simulator. *Human Factors*, 43(3), 483-495.
- Riccio, G.E. (1995). Coordination of postural control and vehicular control: Implications for multimodal perception and simulation of self-motion. In F.C. Hancock (Ed.), *Local applications of the ecological approach to human machine systems* (pp. 122–181). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Rutter, D.R., & Quine, L. (1996). Age and experience in motorcycling safety. *Accident Analysis & Prevention*, 28(1), 15-21.
- Schuemie, M.J., Van der Straaten, P., Krijn, M., & Van der Mast, C.(2001). Research on presence in virtual reality: A survey. *Cyberpsychology & behavior*, 4(2), 183-201.

- Shahar, A., Poulter, D., Clarke, D., & Crundall, D. (2010). Motorcyclists' and car drivers' responses to hazards. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 13, 243-254.
- Sharp, B.R.S. (1971). The stability and control of motorcycles. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 13(5):316-329.
- Siegler, I., Reymond, G., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001). Sensorimotor integration in a driving simulator: Contributions of motion cueing in elementary driving tasks. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Sophia Antipolis, September 2001.
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5), 603-616.
- 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 Section A*, 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, 1010-1025.
- Stoffregen, T.A., Bardy, B.G. Smart, L.J., & Pagulayan, R.J. (2003). On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments. In L.J. Hettinger and M.W. Haas (Eds.), *Psychological issues in the design and use of virtual and adaptive environments* (pp. 111-128). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Tichon, J. (2007). Using presence to improve a virtual training environment. *CyberPsychology & Behavior*, 10(6), 781-787.
- 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.
- van Baren, J., & Ijsselsteijn, W. (2004). Measuring presence: A guide to current measurement approaches. OmniPres project IST-2001-39237, Deliverable 5.
- Vidotto, G., Bastianelli, A., Spoto, A., Torre, E., & Sergeys, F. (2008). Using a riding trainer as a tool to improve hazard perception and awareness in teenagers. *Advances in Transportation Studies Section B*, 16, 51-60.
- Walsche, D., Lewis, E., O'Sullivan, K., & Kim, S.I. (2005). Virtually driving: Are the driving environments "real enough" for exposure therapy with accident victims. *CyberPsychology & Behavior*, 8, 532-537.
- Wilkie, R.M., Wann, J.P., & Allison, R.S. (2008). Active gaze, visual look-ahead and locomotor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(5), 1150-1164.
- 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, 397-412.

- Witmer, B.G., & Singer, M.J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240.
- Witmer, B.G., Jerome, C.J., & Singer, M.J. (2005). The Factor Structure of the Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 14(3), 298-312.
- Yamasaki, G., Aoki, K., Miyamaru, Y., & Ohnuma, K. (1998). Development of motorcycle training simulator. *Journal of the Society of Automotive Engineers*, 19:81–85.

## **10. ANNEXES**

## *Annexe 1 : Questionnaire de présence*

### - Réalisme (7 items) :

Dans quelle mesure vos interactions avec l'environnement vous semblaient-elles naturelles ?

À quel point les aspects visuels vous impliquaient-ils dans l'environnement ?

À quel point le contrôle de vos mouvements et déplacements au sein de l'environnement vous semblait-il naturel ?

Dans quelle mesure les mouvements d'objets dans l'espace vous semblaient-ils convaincants ?

À quel point votre expérience dans cet environnement virtuel ressemblait-elle à votre expérience du monde réel ?

Dans quelle mesure votre sensation de déplacement dans l'environnement virtuel vous semblait-elle convaincante ?

Dans quelle mesure étiez-vous impliqué (engagé) dans cet environnement ?

### - Possibilité d'agir (4 items) :

Dans quelle mesure étiez-vous capable de contrôler les événements ?

Dans quelle mesure l'environnement était-il réactif (sensible) aux actions que vous réalisiez ?

Étiez-vous capable d'anticiper les conséquences des mouvements que vous faisiez ?

Dans quelle mesure étiez-vous capable d'examiner ou d'explorer visuellement l'environnement ?

### - Qualité de l'interface (3 items) :

Quel délai séparant vos actions et leurs conséquences avez-vous ressenti ?

Dans quelle mesure la qualité de l'image interférait-elle ou vous gênait-elle pour réaliser votre tâche ?

Dans quelle mesure les dispositifs de contrôle de vos mouvements dans l'environnement interféraient-ils avec la réalisation de votre tâche ?

### - Possibilité d'examiner (3 items) :

Avec quel niveau de détail pouviez-vous examiner les objets dans la scène ?

Avec quelle précision pouviez-vous examiner un même objet depuis des points de vue différents ?

Dans quelle mesure pouviez-vous vous concentrer sur votre tâche plutôt que sur les dispositifs utilisés pour la réaliser ?

### - Auto-évaluation de la performance (2 items) :

Avec quelle rapidité vous êtes-vous adapté à l'environnement virtuel ?

À la fin de l'expérience, vous sentiez-vous apte à vous déplacer et à interagir avec l'environnement virtuel ?

### - Aspect auditif (3 items) :

À quel point les aspects sonores vous impliquaient-ils dans l'environnement ?

À quel point arriviez-vous à identifier les sons produits ?

Avec quelle précision pouviez-vous localiser les sons ?

### Questionnaire réalisme et contrôlabilité (à remplir après la 1<sup>ère</sup> session de conduite

Les questions sont découpées en 2 parties. Premièrement, des questions portant sur le réalisme de la simulation, c'est-à-dire à quel point le comportement du simulateur et les sensations qu'il procure sont proches de la conduite sur une moto réelle. Voici quelques indications afin de mieux comprendre à quoi peut correspondre la réponse.

Indications pour le réalisme :  $\left\{ \begin{array}{l} \text{« Pas réaliste »} \\ \text{« Très réaliste »} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{« Ce que je ressens sur le simulateur est complètement différent de ce que je ressens sur une moto réelle »} \\ \text{« La réponse de la moto à mes actions est complètement différente de celle d'une moto réelle »} \\ \text{« Ce que je ressens sur le simulateur est exactement la même chose que sur une moto réelle »} \\ \text{« La réponse de la moto à mes actions est exactement la même que celle d'une moto réelle »} \end{array} \right.$

#### Réalisme - Vitesse

01. La sensation de vitesse vous a-t-elle paru réaliste (par rapport à la vitesse affichée au compteur)? Pas réaliste      Très réaliste  
 02. Le son du simulateur vous a-t-il paru réaliste par rapport à la vitesse ? Pas réaliste      Très réaliste

#### Réalisme - Accélération / Freinage

01. L'accélération de la moto – par rapport à votre action sur la poignée des gaz – vous a-t-elle paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 02. La décélération de la moto – par rapport à votre action sur les freins – vous a-t-elle paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 03. Le frein moteur vous a-t-il paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 04. La sensation d'accélération de la moto vous a-t-elle paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 05. Le mouvement des suspensions lors des phases d'accélération/freinage vous a-t-il paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 06. Quelle est votre appréciation globale concernant le réalisme de l'accélération / du freinage ? Pas réaliste      Très réaliste

#### Réalisme - Virage

01. L'inclinaison à gauche ou à droite de la moto vous a-t-elle paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 02. L'effort pour tourner le guidon vous a-t-il paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 03. L'effet du « contre-braquage » au niveau du guidon vous a-t-il paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 04. Par rapport à vos actions sur le guidon, le mouvement de la moto (trajectoire, inclinaison...) vous a-t-il paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 05. Par rapport aux mouvements de votre corps, le mouvement de la moto (trajectoire, inclinaison...) vous a-t-il paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 06. Le délai entre les mouvements de la moto et vos actions vous a-t-il paru réaliste ? Pas réaliste      Très réaliste  
 07. Quelle est votre appréciation globale concernant le réalisme de la prise de virage ? Pas réaliste      Très réaliste

#### Réalisme - Général

Y'a-t-il des aspects (qui n'ont pas été abordés dans les questions précédentes) dont le réalisme ou le non-réalisme vous ont interpellé pendant la simulation ? \_\_\_\_\_

La deuxième partie des questions porte sur la contrôlabilité du simulateur. Voici quelques indications afin de pouvoir plus facilement répondre aux questions.

Indications pour la contrôlabilité :

{ « Pas du tout » → « Je n'ai pas du tout réussi (pas une seule fois) à faire ce que je voulais »  
« Parfaitement » → « J'ai réussi à faire exactement ce que je voulais (même si ce n'est pas forcément de la même manière que sur une moto réelle) »

#### **Contrôlabilité de la moto - Tâche d'évitement**

- |  |             |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |              |
|--|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 01. Avez-vous réussi à contrôler la vitesse de la moto comme vous le souhaitiez ?                                | Pas du tout | <input type="radio"/> | Parfaitement |
| 02. Avez-vous réussi à passer les vitesses comme vous le souhaitiez ?  | Pas du tout | <input type="radio"/> | Parfaitement |
| 03. Avez-vous réussi à contrôler la trajectoire de la moto comme vous le souhaitiez dans la ligne droite ?       | Pas du tout | <input type="radio"/> | Parfaitement |
| 04. Avez-vous réussi à effectuer l'évitement comme vous le souhaitiez ?  | Pas du tout | <input type="radio"/> | Parfaitement |
| 05. Avez-vous réussi à contrôler l'inclinaison de la moto (à gauche ou à droite) comme vous le souhaitiez ?      | Pas du tout | <input type="radio"/> | Parfaitement |
| 06. Quelle est votre appréciation globale concernant la contrôlabilité du simulateur pour la tâche d'évitement ? | Mauvaise    | <input type="radio"/> | Excellente   |
| 07. Quelles difficultés avez-vous rencontrées lors de la tâche d'évitement ?                                     | <hr/> <hr/> |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |              |

#### **Contrôlabilité de la moto - Tâche de slalom**

- |  |             |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |              |
|--|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 01. Avez-vous réussi à contrôler la vitesse de la moto comme vous le souhaitiez ?                              | Pas du tout | <input type="radio"/> | Parfaitement |
| 02. Avez-vous réussi à passer les vitesses comme vous le souhaitiez ?  | Pas du tout | <input type="radio"/> | Parfaitement |
| 03. Avez-vous réussi à contrôler la trajectoire de la moto comme vous le souhaitiez pour la première porte ?   | Pas du tout | <input type="radio"/> | Parfaitement |
| 04. Avez-vous réussi à contrôler la trajectoire de la moto comme vous le souhaitiez entre 2 portes ?           | Pas du tout | <input type="radio"/> | Parfaitement |
| 05. Avez-vous réussi à contrôler l'inclinaison de la moto (à gauche ou à droite) comme vous le souhaitiez ?    | Pas du tout | <input type="radio"/> | Parfaitement |
| 06. Quelle est votre appréciation globale concernant la contrôlabilité du simulateur pour la tâche de slalom ? | Mauvaise    | <input type="radio"/> | Excellente   |
| 07. Quelles difficultés avez-vous rencontrées lors du slalom ?   | <hr/> <hr/> |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |              |

**Contrôlabilité de la moto - Conduite en ville**

- 01. Avez-vous réussi à contrôler la vitesse de la moto comme vous le souhaitiez ?          Parfaitement
- 02. Avez-vous réussi à doser le freinage de la moto comme vous le souhaitiez ?          Parfaitement
- 03. Avez-vous réussi à doser l'accélération de la moto comme vous le souhaitiez ?          Parfaitement
- 04. Avez-vous réussi à passer les vitesses comme vous le souhaitiez ?          Parfaitement
- 05. Avez-vous réussi à contrôler la trajectoire de la moto comme vous le souhaitiez dans les lignes droites ?          Parfaitement
- 06. Avez-vous réussi à contrôler la trajectoire de la moto comme vous le souhaitiez dans les virages à 90° ?          Parfaitement
- 07. Avez-vous réussi à contrôler l'inclinaison de la moto (à gauche ou à droite) comme vous le souhaitiez ?          Parfaitement
- 08. Quelle est votre appréciation globale concernant la contrôlabilité du simulateur en conduite en ville ?          Excellente
- 09. Quelles difficultés avez-vous rencontrées lors de la conduite en ville ? \_\_\_\_\_

**Contrôlabilité de la moto - Conduite sur route de campagne**

- 01. Avez-vous réussi à contrôler la vitesse de la moto comme vous le souhaitiez ?          Parfaitement
- 02. Avez-vous réussi à doser le freinage de la moto comme vous le souhaitiez ?          Parfaitement
- 03. Avez-vous réussi à doser l'accélération de la moto comme vous le souhaitiez ?          Parfaitement
- 04. Avez-vous réussi à passer les vitesses comme vous le souhaitiez ?          Parfaitement
- 05. Avez-vous réussi à contrôler la trajectoire de la moto comme vous le souhaitiez lors des entrées de virage ?          Parfaitement
- 06. Avez-vous réussi à contrôler la trajectoire de la moto comme vous le souhaitiez pendant les virages ?          Parfaitement
- 07. Avez-vous réussi à contrôler la trajectoire de la moto comme vous le souhaitiez lors des sorties de virage ?          Parfaitement
- 08. Avez-vous réussi à contrôler l'inclinaison de la moto (à gauche ou à droite) comme vous le souhaitiez ?          Parfaitement
- 09. Quelle est votre appréciation globale concernant la contrôlabilité du simulateur ?          Excellente
- 10. Quelles difficultés avez-vous rencontrées lors de la conduite sur route de campagne ? \_\_\_\_\_

Simulation de conduite moto :  
Effets du roulis visuel sur le contrôle de trajectoire lors de la prise de virage

Régis Lobjois  
LEPSiS – IFSTTAR

Franck Mars  
IRCyNN – Nantes

Isabelle Siegler  
Laboratoire Complexité, Innovation, Activités Motrices et Sportives  
UFR STAPS, Université Paris Sud

La simulation de conduite est aujourd'hui un outil largement privilégié pour étudier les comportements des conducteurs ainsi que les processus sous-tendant ces comportements. Dans une perspective centrée « conducteur », produire un simulateur de conduite moto validé constitue cependant un pré-requis indispensable. Si les connaissances parcellaires de la conduite moto entretiennent très certainement la controverse sur les modalités du rendu inertiel et sur l'algorithme de restitution du mouvement (maintien d'une inclinaison dans le virage, ou restitution d'un mouvement de type « wash-out » calqué sur la simulation de vol), un consensus semble être trouvé sur l'introduction d'un roulis visuel (inclinaison de la scène dans la direction opposée à celle du virage) pour assurer l'illusion d'inclinaison (e.g., Cossalter et al., 2010 ; Stedmon et al., 2011). Cependant, l'introduction de ce roulis va inmanquablement modifier la dynamique de la scène visuelle. Se pose alors la question de ses effets sur la dynamique du regard et sur les stratégies visuelles dans le référentiel 3D de l'environnement. L'objectif de ce travail était donc d'étudier les effets du roulis visuel sur les stratégies oculaires, les performances de conduite et la survenue du mal du simulateur. Les premiers résultats montrent que plus le roulis visuel augmente, plus les participants ont tendance à couper les virages. Cette position latérale moyenne décalée vers l'intérieur du virage s'accompagne d'une augmentation du nombre de sorties de voie. Sur les directions du regard, les résultats mettent en évidence un relatif maintien de la stratégie point tangent. Cependant, si la manipulation du roulis visuel n'influence pas du tout le positionnement du regard sur l'axe horizontal, on observe, sur l'axe vertical, une direction moyenne du regard en amont du point tangent, synonyme d'une plus grande anticipation. L'implication de ces résultats pour la simulation de conduite moto est discutée au regard des modèles théoriques du contrôle visuel de la trajectoire.

# Simulation de conduite moto : Effets du roulis visuel sur le contrôle de trajectoire et les stratégies visuelles lors de la prise de virage

Régis Lobjois (IFSTTAR–LEPSiS), Franck Mars (IRCCyN), Isabelle Siegler (Université Paris Sud)



Projet financé par la

Fondation  
Sécurité Routière

Journées Scientifiques "Deux-roues motorisés"  
15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron  
Groupe d'Échanges et de Recherche de l'Ifsttar (GERI)  
"Deux-roues motorisés"



Les simulateurs de conduite moto utilisés à des fins de recherche

- Au nombre de 4

## ① Le Honda Riding Trainer:

- ☺ simulateur de table, à bas coût,
- ☹ interactif, peu immersif,
- ☺ pas de restitution de mouvement
- ☺ destiné à la sensibilisation des jeunes conducteurs aux situations à risque (surgissement piéton, ouverture portière, intersection)
- ☹ scénarii écrits « en dur »



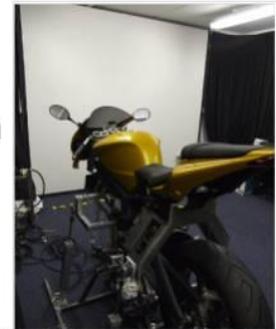


## Les simulateurs de conduite moto utilisés à des fins de recherche

- Au nombre de 4

### ② Le MotorcycleSim de l'Université de Nottingham

- ☺ simulateur interactif et immersif,
- ☺ restitution de mouvement,
- ☺ 2 DDL (retour d'effort guidon, et inclinaison en roulis  $\pm 25$  degrés),
- ☺ destiné à étudier à la fois les aspects ergonomiques d'une moto et les comportements des conducteurs



Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron

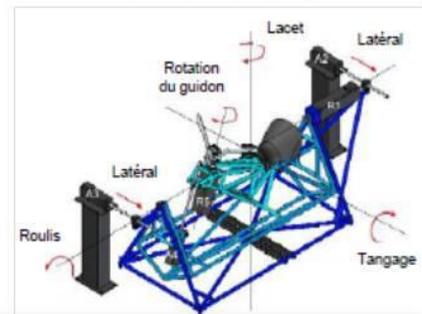


## Les simulateurs de conduite moto utilisés à des fins de recherche

- Au nombre de 4

### ③ Le simulateur de l'Université de Padoue

- ☺ simulateur dit de haut niveau,
- ☺ restitution de mouvement,
- ☺ 5 DDL (lacet  $\pm 20^\circ$ , roulis  $\pm 20^\circ$ , tangage  $\pm 10^\circ$ , mouvement latéral  $\pm 0,3$  m, et retour d'effort guidon),
- ☺ destiné à étudier les interactions homme-véhicule (systèmes d'aide)



Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron

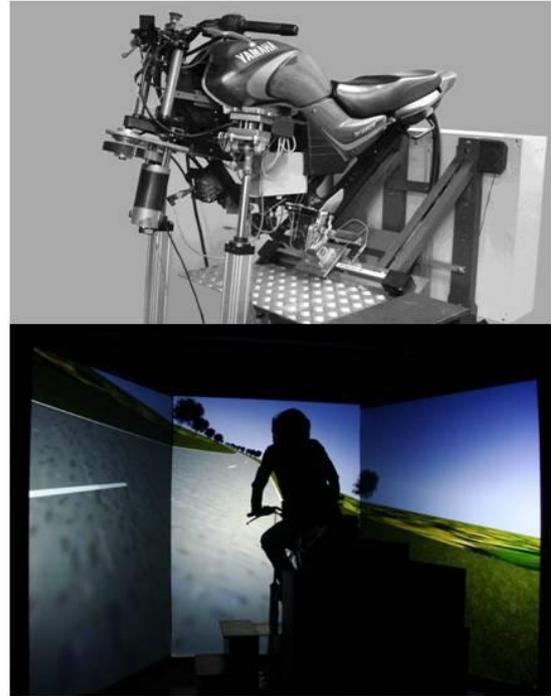


## Les simulateurs de conduite moto utilisés à des fins de recherche

- Au nombre de 4

### ④ Le simulateur IFSTTAR

- ☺ simulateur interactif et immersif,
- ☺ restitution de mouvement,
- ☺ 4 DDL (lacet  $\pm 6^\circ$ , tangage  $\pm 8^\circ$ , roulis  $\pm 12^\circ$ , et retour d'effort guidon),
- ☺ restitution visuelle modulable (de  $72^\circ$  à  $360^\circ$ )
- ☺ pour l'étude des comportements de conduite



Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



### Controverse sur les modalités de la restitution de mouvement

- Approche par la réalité physique majoritaire
- Spécificité mécanique et logicielle de chaque plate-forme
- Connaissance parcellaire de la conduite moto

### Consensus sur l'introduction d'un roulis visuel pour assurer l'illusion d'inclinaison

Rotation de la scène  
 en sens opposé à la  
 direction du virage



Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



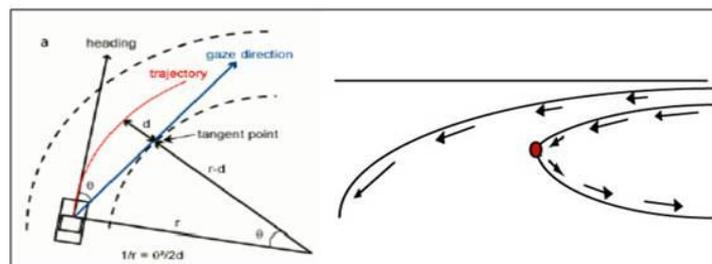
## Consensus sur l'introduction d'un roulis visuel pour assurer l'illusion d'inclinaison

- ++++ - induit une sensation d'inclinaison si simulateur statique (Stedmon et al., 2011)
- renforce l'illusion si simulateur dynamique
- et permet de limiter l'amplitude du roulis physique, synonyme de sensation de chute (Shahar et al., in press)
- contribue à la fidélité physique du dispositif de RV (Stedmon et al., 2011)
  
- - introduit une rotation artificielle dans le flux optique
- perturbe les référentiels spatiaux (impliqués dans le contrôle de l'équilibre)
- modifie la dynamique de la scène visuelle
- consensus établi essentiellement sur la base de données subjectives
- absence d'une métrique commune pour quantifier le roulis visuel

Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



## Effet sur la dynamique de la scène visuelle ?

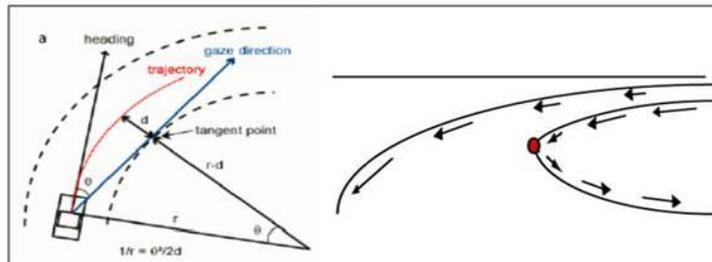


- relation étroite entre les stratégies visuelles et le contrôle de trajectoire en virage
- le point tangent, point particulier dans le virage
- utilisé comme indice de référencement des directions de regard, car position, dans l'environnement 3D, connue

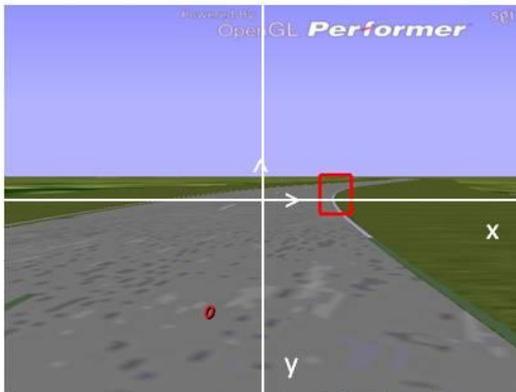
Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



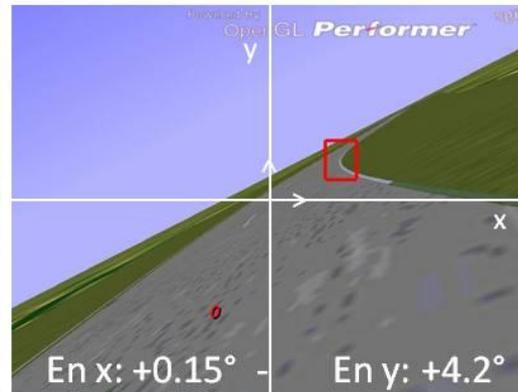
Effet sur la dynamique de la scène visuelle ?



Roulis visuel : 0°



Roulis visuel : 26°



Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



### Objectifs de l'étude

- Manipuler et comparer différentes amplitudes de roulis visuel
- Evaluer leurs effets sur les processus sous-tendant le contrôle de trajectoire, en l'occurrence les stratégies visuelles

#### RV

- s'appuyer sur des mesures objectives
- dépasser les seules performances de conduite

#### Fondam.

- stratégie "point tangent" chez les motocyclistes ?
- absence d'effet sur l'axe horizontal
- quel effet sur l'axe vertical ?
  - Report ? (absence d'effet axe y)
  - Compensation ? Nature ?

Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



## Méthodes

**Participants:** n = 12

5 participants: 600 à 750 cm<sup>3</sup>

7: supérieure à 1000 cm<sup>3</sup>

	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Age	35,6	11,9	22,5	55,8
Permis B (an)	16,59	11,53	3	36
Km/an	12916	12738	1000	45000
Permis A (an)	13,75	11,99	2	36
Km/an	14250	7021	5000	30000
Heures/sem aine	14,41	12,97	5	50
Type de route fréquentée (%)				
Urbain	36,2	20,8	5	70
Péri-urbain	42,1	22,9	0	70
Rural	21,7	19,5	0	70

## Dispositif:

- Simulateur IFSTTAR dans sa version statique
- Oculomètre Pertech, tête portée, synchronisé avec le simulateur
- Dans un environnement rural, sans trafic, avec alternance ligne droite-virage



Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron

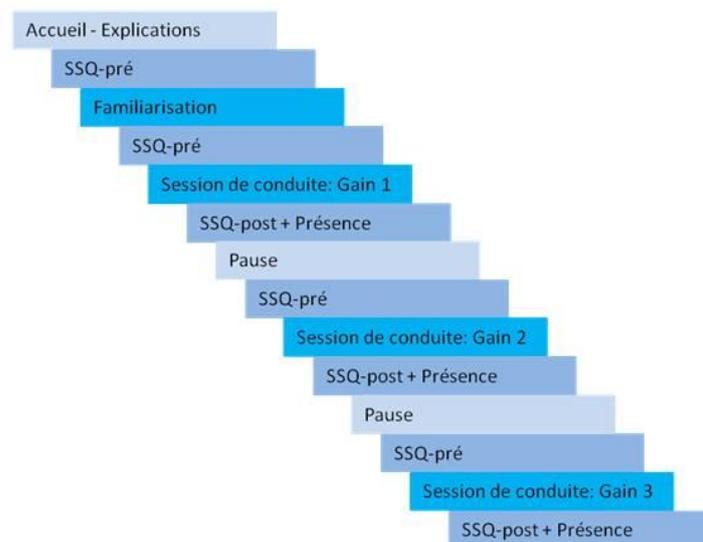


## Méthodes

### Plan expérimental

- 3 gains visuels: 0, 0.2 et 0.4, soit 20 et 40% de l'inclinaison d'une moto réelle

### Procédure expérimentale



Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



## Résultats 1/4



Vidéos illustrant l'effet du gain visuel sur la dynamique de la scène et du point tangent

Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



## Résultats 2/4

### Effet du gain visuel sur la dynamique de la scène (roulis visuel)

- Roulis visuel: dépend de la vitesse de passage dans le virage et de la courbure de la trajectoire



Libre contrôle de la vitesse (100 km/h) et de la trajectoire



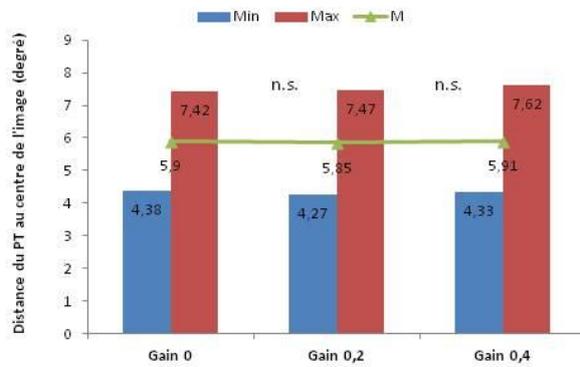
	Roulis visuel (degré)	
	Moyen	Max
Gain 0	0,00*	0,00*
Gain 0,2	4,06*	5,11*
Gain 0,4	8,57*	10,80*

Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron

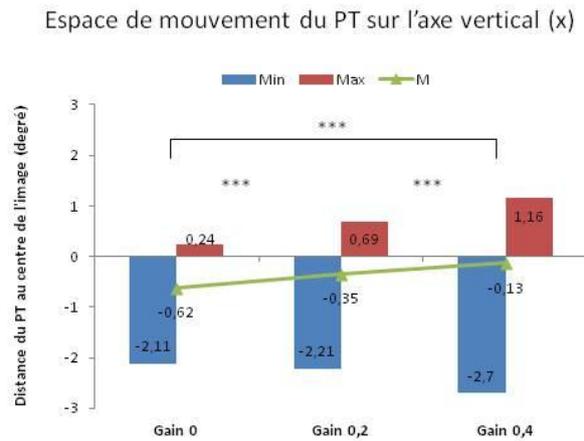


## Résultats 2/4

### Effet du gain visuel sur la dynamique du point tangent



Espace de mouvement du PT sur l'axe horizontal (x)



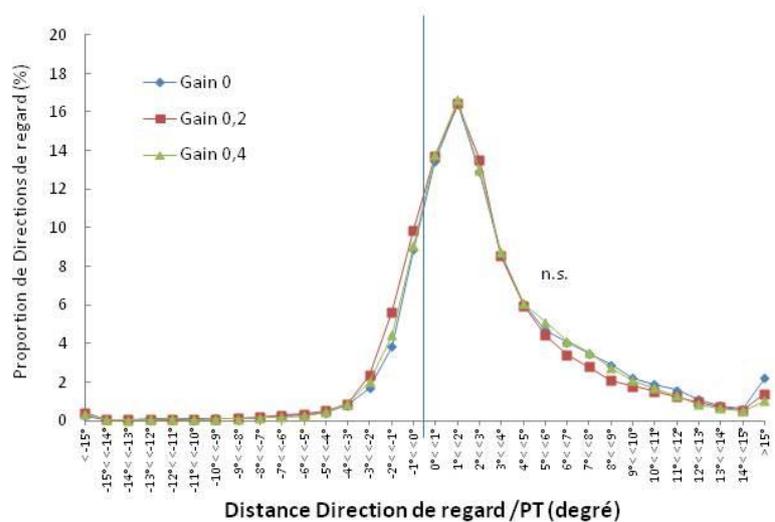
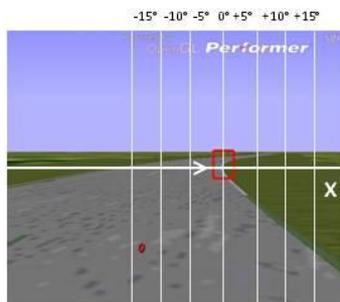
Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



## Résultats 3/4

### Effet du gain visuel sur les directions de regard au point tangent

Sur l'axe horizontal (x)



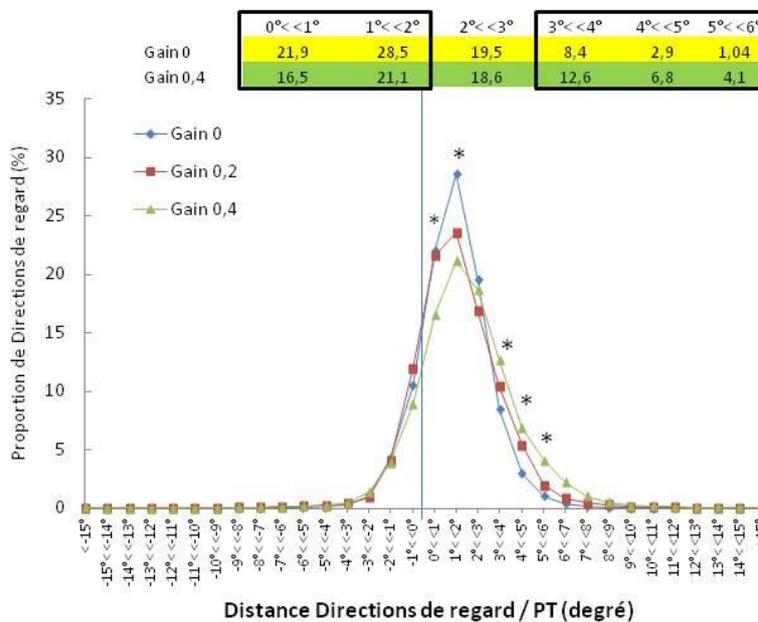
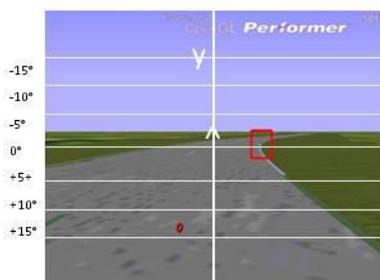
Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



## Résultats 3.5/4

### Effet du gain visuel sur les directions de regard au point tangent

Sur l'axe vertical (y)



## Résultats 4/4

### Effet du gain visuel sur les comportements de conduite

	Vitesse (km/h)	Ecart latéral (en cm / centre de voie)	Variabilité de l'écart latéral (cm)	Nombre de sorties de voie
Gain 0	105,3	48,28	29,28	1
Gain 0,2	104,1	60,48	30,6	12
Gain 0,4	107,0	65,6	32,82	13
	n.s.	***	***	***

+ Absence d'effet du gain visuel sur les scores au questionnaire du mal du simulateur



## Discussion / conclusion

### **Réalité virtuelle**

- effets significatifs sur des variables souvent utilisées dans les études sur simulateur de conduite (position latérale, variabilité)
- des sorties de voie en nombre...
- effets sur les directions de regard, avec une modification du positionnement moyen sur l'axe vertical
- absence d'effet sur le mal du simulateur



- le roulis visuel est à proscrire, ou tout au moins à limiter, en simulation moto...
- quels effets sur d'autres types de situations, de tâches ?
- quelles relations avec le roulis physique ?

Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



## Discussion / conclusion

### **Aspects fondamentaux**

- relatif maintien de la stratégie point tangent (gain 0), l'essentiel des fixations se situant de façon légèrement décalée du PT de 3° en x et 1° en y
- avec le roulis visuel, pas de report à l'identique des directions de regard sur l'axe vertical
- réorganisation des stratégies visuelles (mais qui n'est pas massive...) vers l'acquisition d'informations plus éloignées



- quelle signification en termes de sources d'informations visuelles ?
- autres analyses à effectuer sur les données...

Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron



**Merci de votre attention**

Journées Scientifiques « Deux-roues motorisés », 15 et 16 octobre 2013, Lyon-Bron