



IFSTTAR

LEPSIS



Comprendre le monde,  
construire l'avenir®

## THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS-SUD**

Spécialité : « *Sciences du Sport, de la Motricité  
et du Mouvement Humain* »

Ecole Doctorale 456

par

**Virginie DAGONNEAU**

Titre :

### **ÉTUDE DES LIENS ENTRE IMMERSION ET PRÉSENCE POUR LA MISE AU POINT D'UN SIMULATEUR DE CONDUITE DE DEUX-ROUES MOTORISÉ**

effectuée au Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations de l'Ifsttar

co-dirigée par Mme Isabelle Israël et M. Régis Lobjois  
et soutenue publiquement le 12 Octobre 2012

devant le jury composé de :

M. Michel JOHNSON	Professeur adjoint, Université de Moncton (CA), EKR	Rapporteur
M. Jean-Louis VERCHER	Directeur de Recherche (HDR), CNRS et Aix Marseille Université, ISM	Rapporteur
M. Stéphane ESPIÉ	Directeur de Recherche (HDR), Ifsttar, IMO	Président
M. Brice ISABLEU	Maître de Conférences (HDR), Université Paris-Sud, CIAMS	Examineur
M. Régis LOBJOIS	Chargé de Recherche, Ifsttar, LEPSIS	co-Directeur de thèse
Mme Isabelle ISRAËL	Chargé de Recherche (HDR), CNRS Paris	co-Directrice de thèse



À mes parents



# Remerciements

Je remercie en premier lieu ma directrice de thèse Mme Isabelle Israël et mon co-directeur de thèse M. Régis Lobjois pour avoir dirigé mon travail de thèse. Je vous remercie pour votre confiance, votre disponibilité ainsi que pour vos conseils avisés tout au long de ces années de thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement les membres du jury, M. Michel Johnson et M. Jean-Louis Vercher qui me font l'honneur d'être rapporteurs de ce manuscrit, ainsi que M. Brice Isableu et M. Stéphane Espié qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Je remercie l'INRETS qui a financé cette thèse durant trois années et m'a permis de réaliser cette thèse dans de bonnes conditions.

Je remercie également tous les membres du LEPSiS pour ces trois années passées à leur côté. Je tiens à remercier plus particulièrement Elodie, Feirouz, Julien, Baptiste, Florent, Clément, Lancelot, Josselin, Abderrahmane et bien d'autres, pour leur bonne humeur ainsi que leur conversation toujours joviale autour de la machine à café. Merci à mon collègue de bureau, Amit, pour nos nombreux échanges scientifiques, linguistiques et de société. Un grand merci également à Samuel pour ses blagues, son soutien et aussi ses relectures minutieuses de parties du manuscrit qui m'ont permis de l'améliorer et de le rendre lisible. Un très grand merci à Carine, pour sa joie de vivre, son soutien inconditionnel et nos sorties entre 'filles'.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Fabrice et Stéphane pour leur aide technique et leur disponibilité à toute heure, ainsi que pour leurs conseils éclairés et leur encouragements. Merci également à Marc du CIAMS pour son aide précieuse sur l'étude de la variabilité interindividuelle.

Je remercie l'ensemble des sujets qui ont accepté de participer à mes différentes études expérimentales, avec une pensée particulière à ceux qui sont venus bénévolement à des horaires décalés (avant et après leur journée de travail) et ceux qui ont souffert de mal du simulateur. Merci également à la Fédération Française des Motards en Colère de m'avoir aidé dans la publication de mes annonces et de m'avoir ainsi facilité le recrutement de participants.

Merci à mes amis, ma famille et belle-famille, pour leur soutien et encouragements permanents, et plus particulièrement durant la période de rédaction et de correction de la thèse.

Je remercie enfin Antoine pour tout ce qu'il m'a apporté pendant toutes ces années... grâce à toi, j'ai tenu bon !



# Table des matières

<b>I Cadre théorique</b>	<b>9</b>
<b>Introduction</b>	<b>11</b>
<b>1 Deux-roues motorisé et accidentologie : un phénomène d'ampleur</b>	<b>13</b>
1.1 Les grands traits de l'accidentologie en deux-roues motorisé [ONISR, 2010]	13
1.2 Les facteurs explicatifs	14
1.3 Les solutions envisagées	15
<b>2 Perception du mouvement propre</b>	<b>17</b>
2.1 Les cadres de référence de l'orientation spatiale	17
2.2 Le système visuel	18
2.2.1 Mécanisme de la perception visuelle : de la rétine au nerf optique...	18
2.2.2 Du nerf optique à la voie optique primaire : la perception visuelle consciente	20
2.2.3 Conclusion	21
2.3 Le système vestibulaire	22
2.3.1 Les canaux semi-circulaires	23
2.3.2 Les organes otolithiques	27
2.3.3 Conclusion	30
2.4 La somesthésie	31
2.5 Intégration multisensorielle par le cerveau : l'émergence d'une perception unifiée	31
2.6 Conséquences physiologiques lors de l'inclinaison en roulis : spécificité de la conduite motocycliste sur route et sur simulateur	33
2.7 Conclusion	36
<b>3 Architecture des simulateurs de conduite</b>	<b>37</b>
3.1 Architecture structurelle usuelle d'un simulateur de conduite	37
3.2 Architecture logicielle usuelle d'un simulateur de conduite	38
3.3 Les simulateurs de deux-roues motorisé : leurs caractéristiques architecturales et dynamiques	39
3.3.1 Les simulateurs Honda	41
3.3.2 Le simulateur de l'université de Tokyo	45
3.3.3 Le simulateur de l'université Nihon [Kageyama et Tagami, 2002]	46
3.3.4 Le simulateur MORIS (Motorcycle Rider Simulator)	47
3.3.5 Le simulateur DIGEM (anciennement Fastbike)	48
3.3.6 Le simulateur Honda Riding Trainer	49
3.3.7 Le simulateur IFSTTAR	50

3.3.8	Le simulateur MotorcycleSim [Stedmon et al., 2009]	52
3.4	Conclusion	53
<b>4</b>	<b>La validité des environnements virtuels</b>	<b>55</b>
4.1	Une conceptualisation variée de la validité	55
4.1.1	Validité	55
4.1.2	Fidélité	56
4.1.3	Réalisme	58
4.1.4	Présence	58
4.2	Critique des concepts : Sur quels concepts s'appuyer ?	70
4.3	Validité des environnements virtuels, en particulier des simulateurs de conduite : des résultats empiriques	72
4.3.1	Le mal du simulateur	72
4.3.2	L'approche élément par élément : les études focalisées sur...	74
4.3.3	L'approche globale : le simulateur est évalué comme un tout	80
4.3.4	Le sentiment de présence : une approche alternative pour évaluer la validité	82
4.4	La validation des simulateurs moto	83
4.5	Conclusion	87
<b>5</b>	<b>Synthèse de la revue de littérature</b>	<b>91</b>
<b>II</b>	<b>Cadre expérimental</b>	<b>95</b>
<b>6</b>	<b>Méthode générale</b>	<b>97</b>
6.1	Participants	97
6.2	Dispositif expérimental	98
6.2.1	Architecture du simulateur IFSTTAR	98
6.2.2	Restitution du roulis pendant la phase d'équilibre du virage : Caractérisation de la cinématique du mouvement lors d'une inclinaison en roulis	98
6.2.3	Restitution visuelle	103
6.2.4	Restitution sonore	104
<b>7</b>	<b>Expérience 1 : Étude de la sensibilité des conducteurs au mouvement de roulis sur simulateur moto : Effet de la cinématique du mouvement, de la direction d'inclinaison et de la condition visuelle sur les seuils de détection du mouvement et de l'inclinaison et le seuil de perception de la chute.</b>	<b>105</b>
7.1	Motivation et problématique de l'étude	105
7.2	Méthode	107
7.2.1	Participants	107
7.2.2	Dispositif expérimental et tâche	107
7.2.3	Plan expérimental	108
7.2.4	Procédure	108
7.2.5	Analyse des données	110
7.3	Résultats	110
7.3.1	Détection du mouvement	111
7.3.2	Détection de l'inclinaison	111

7.3.3	Perception de la chute . . . . .	112
7.4	Discussion . . . . .	115
<b>8</b>	<b>Expérience 2 : Effet du positionnement de l'axe de rotation sur le seuil de détection de l'inclinaison et le seuil de perception de la chute.</b>	<b>125</b>
8.1	Motivation et problématique de l'étude . . . . .	125
8.2	Méthode . . . . .	127
8.2.1	Participants . . . . .	127
8.2.2	Dispositif expérimentale et tâche . . . . .	127
8.2.3	Plan expérimental . . . . .	127
8.2.4	Procédure . . . . .	128
8.2.5	Analyse des données . . . . .	128
8.3	Résultats et discussion . . . . .	129
<b>9</b>	<b>Expérience 3 : Identification des paramètres du modèle de restitution visuo-inertielle de roulis ou comment les angles de roulis visuel et de roulis physique contribuent à la production d'une illusion d'inclinaison crédible lors d'une prise de virage.</b>	<b>133</b>
9.1	Motivation et problématique de l'étude . . . . .	133
9.2	Méthode . . . . .	135
9.2.1	Participants . . . . .	135
9.2.2	Dispositif expérimental . . . . .	135
9.2.3	Tâche et plan expérimental . . . . .	135
9.2.4	Procédure . . . . .	138
9.2.5	Analyses des données . . . . .	138
9.3	Résultats . . . . .	139
9.3.1	Roulis physique . . . . .	139
9.3.2	Roulis visuel . . . . .	139
9.3.3	Roulis global (somme du roulis physique et visuel) . . . . .	140
9.3.4	Gain (ratio roulis visuel/physique) . . . . .	140
9.3.5	Vitesse et rayon de courbure . . . . .	141
9.3.6	Autres patterns de réponse . . . . .	142
9.3.7	Scores au SSQ . . . . .	142
9.4	Discussion . . . . .	143
9.4.1	Le roulis global, ou quelle proportion d'inclinaison faut-il restituer ? . . . . .	144
9.4.2	Comment répartir le roulis physique et le roulis visuel ? . . . . .	144
9.4.3	Quel rôle le roulis visuel joue-t-il dans l'illusion d'inclinaison ? . . . . .	145
9.4.4	Dans quelle direction le roulis visuel doit-il être incliné par rapport à la direction du virage ? . . . . .	146
9.4.5	Effet du rayon de courbure sur l'amplitude de roulis . . . . .	147
<b>10</b>	<b>Expérience 4 : Etude de la sensibilité des conducteurs au mouvement de roulis physique et visuel sur simulateur moto : Effet du couplage préférentiel sur les seuils de détection du mouvement et de l'inclinaison et le seuil de perception de la chute.</b>	<b>149</b>
10.1	Motivation et problématique de l'étude . . . . .	149
10.2	Méthode générale . . . . .	149
10.2.1	Participants . . . . .	149

10.2.2	Dispositif expérimental et tâche . . . . .	150
10.2.3	Procédure . . . . .	150
10.3	Expérience 4A : Couplage préférentiel « Direction Opposée » . . . . .	151
10.3.1	Participants . . . . .	151
10.3.2	Plan expérimental . . . . .	151
10.3.3	Procédure . . . . .	152
10.3.4	Analyse des données . . . . .	152
10.3.5	Résultats . . . . .	152
10.3.6	Discussion . . . . .	156
10.4	Expérience 4B : Couplage préférentiel « Même Direction » . . . . .	159
10.4.1	Participants . . . . .	159
10.4.2	Plan expérimental . . . . .	160
10.4.3	Procédure . . . . .	160
10.4.4	Analyse des données . . . . .	160
10.4.5	Résultats . . . . .	160
10.4.6	Discussion . . . . .	163
10.5	Expérience 4C : Couplage préférentiel « Horizon Stationnaire » . . . . .	165
10.5.1	Participants . . . . .	165
10.5.2	Plan expérimental . . . . .	166
10.5.3	Procédure . . . . .	166
10.5.4	Analyse des données . . . . .	166
10.5.5	Résultats . . . . .	166
10.5.6	Discussion . . . . .	169
10.6	Conclusion . . . . .	171
<b>11</b>	<b>Expérience 5 : Influence de la taille du champ de vision horizontal sur la contribution du roulis visuel et physique à la production d'une illusion d'inclinaison crédible.</b>	<b>173</b>
11.1	Motivation et problématique de l'étude . . . . .	173
11.2	Méthode . . . . .	174
11.2.1	Participants . . . . .	175
11.2.2	Analyses des données. . . . .	175
11.3	Résultats . . . . .	175
11.3.1	Roulis physique . . . . .	175
11.3.2	Roulis visuel . . . . .	176
11.3.3	Roulis global (somme du roulis visuel et physique) . . . . .	177
11.3.4	Gain (ratio roulis visuel/physique) . . . . .	177
11.3.5	Vitesse et rayon de courbure . . . . .	177
11.3.6	Autres patterns de réponse . . . . .	179
11.3.7	Scores au SSQ . . . . .	179
11.4	Discussion . . . . .	180
11.4.1	Le roulis global, ou quelle proportion d'inclinaison faut-il restituer ? . . . . .	180
11.4.2	Comment répartir le roulis physique et le visuel ? . . . . .	181
11.4.3	Quel rôle le roulis visuel joue-t-il dans l'illusion d'inclinaison ? . . . . .	181
11.4.4	Dans quelle direction le roulis visuel doit-il être incliné par rapport à la direction du virage ? . . . . .	182

11.4.5	Effet du rayon de courbure sur l'amplitude de roulis . . . . .	182
11.4.6	Effet de la taille du champ visuel sur l'amplitude du roulis . . . . .	183
<b>12</b>	<b>Expérience 6 : Effet du couplage entre le roulis physique et le roulis visuel et de la taille du champ visuel sur la détection du mouvement et de l'inclinaison, et sur la perception de la chute.</b>	<b>185</b>
12.1	Motivation et problématique de l'étude . . . . .	185
12.2	Expérience 6A : Détection du mouvement et de l'inclinaison . . . . .	186
12.2.1	Méthode . . . . .	186
12.2.2	Résultats . . . . .	189
12.2.3	Discussion . . . . .	192
12.3	Expérience 6B : Perception de la chute . . . . .	197
12.3.1	Méthode . . . . .	197
12.3.2	Résultats . . . . .	202
12.3.3	Discussion . . . . .	207
<b>13</b>	<b>Expérience 7 : Evaluation de la validité du simulateur IFSTTAR au travers de la phase de familiarisation et du sentiment de présence.</b>	<b>211</b>
13.1	Motivation et problématique de l'étude . . . . .	211
13.2	Méthode . . . . .	212
13.2.1	Participants . . . . .	212
13.2.2	Dispositif expérimental et tâche . . . . .	212
13.2.3	Plan expérimental . . . . .	216
13.2.4	Mesures expérimentales . . . . .	217
13.2.5	Procédure . . . . .	218
13.2.6	Analyse des données . . . . .	219
13.3	Résultats . . . . .	220
13.3.1	Contrôle de trajectoire . . . . .	220
13.3.2	Charge mentale : caractérisation de l'effort fourni pour le contrôle de trajectoire au travers du SSR. . . . .	223
13.3.3	Contrôle longitudinal . . . . .	225
13.3.4	Durée de familiarisation . . . . .	226
13.3.5	Sentiment de présence . . . . .	226
13.3.6	Positionnement de l'individu par rapport à l'environnement virtuel . . . . .	227
13.3.7	Scores au SSQ . . . . .	229
13.3.8	Comparaison par classement des modèles dynamiques . . . . .	229
13.4	Discussion . . . . .	230
<b>14</b>	<b>Discussion générale et perspectives</b>	<b>237</b>
14.1	Discussion et critiques des principaux résultats . . . . .	237
14.2	Pertinence de la méthodologie employée . . . . .	240
14.3	Pertinence du concept de présence pour évaluer les simulateurs de conduite . . . . .	241
14.4	Perspectives - Conception du simulateur : principales pistes de travail envisagées . . . . .	242
<b>A</b>	<b>Questionnaire de prédisposition au mal des transports (MSHQ)</b>	<b>245</b>
<b>B</b>	<b>Questionnaire du mal du simulateur (SSQ)</b>	<b>247</b>

<b>C</b>	<b>Questionnaire de Présence : Slater Usoh Steed Questionnaire (SUS)</b>	<b>249</b>
<b>D</b>	<b>Questionnaire sur l'état de Présence (PQ-F)</b>	<b>253</b>
<b>E</b>	<b>Questionnaire sur la propension à l'immersion (ITQ-F)</b>	<b>257</b>
<b>F</b>	<b>Liste des contraintes comportementales à satisfaire</b>	<b>261</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>262</b>

**Première partie**

**Cadre théorique**



# Introduction

Historiquement, le développement de simulateurs a principalement été motivé par la préparation et la formation des futurs pilotes de l'air. Dans le domaine de la conduite automobile, le recours à la simulation est aujourd'hui soutenu par des politiques de sécurité routière afin de réduire l'accidentalité, notamment celle des usagers de deux-roues motorisé, qui reste la catégorie d'usagers la plus vulnérable. Ces efforts politiques ont contribué, depuis une décennie environ, à un essor des simulateurs de conduite de deux-roues motorisé, plus de 30 ans après l'apparition des premiers simulateurs de conduite automobile. De plus, les nombreux avantages des simulateurs (sécurité, reproductibilité, contrôle expérimental) poussent à une systématisation de leur utilisation dans des domaines d'étude variés (ergonomie, psychologie, ingénierie).

Comme pour tout outil scientifique, il est nécessaire de s'assurer qu'il mesure efficacement l'objet d'étude, en particulier lorsqu'il s'agit d'étudier le comportement humain. Le simulateur ne doit ainsi pas modifier, influencer l'objet de l'étude. La question de sa validité est donc posée. Les données disponibles indiquent toutefois que les simulateurs de conduite qui font l'objet, avant leur commercialisation, d'une évaluation permettant de déterminer si les comportements produits par les usagers sont naturels et sans acquis préalable, sont rares. Cette évaluation du degré de validité est critique pour tout simulateur censé (re)produire une sensation de conduite 'naturelle', en particulier les simulateurs dédiés à la formation ou à l'étude du comportement des conducteurs.

Par ailleurs, les limites en déplacement des systèmes de restitution inertielle rendent impossible une reproduction fidèle des stimuli perceptifs. Ceci souligne la nécessité de questionner la validité des simulateurs afin de produire des illusions perceptives crédibles et acceptées par les utilisateurs. Dans le cas de la simulation de conduite de deux-roues motorisé, la restitution du roulis représente un enjeu majeur. En effet, alors qu'en conduite sur route un deux-roues motorisé peut avoir un angle de roulis de plus de 55 degrés, l'inclinaison maximale des simulateurs moto à plate-forme dynamique est comprise entre 12,5 et 25 degrés (selon les limites en déplacement des plates-formes mobiles). Essentiel au contrôle de l'équilibre et au contrôle de trajectoire, il apparaît fondamental de déterminer les espaces de mouvement en roulis nécessaires et suffisants pour produire une 'bonne' illusion et permettre une conduite 'naturelle' sur simulateur. Le mouvement de roulis constitue donc l'axe de recherche principal de cette thèse, au travers de la définition de ses caractéristiques en simulation de conduite deux-roues motorisé.

Enfin, on peut noter l'emploi récent dans la littérature du concept de *présence* afin d'évaluer et de qualifier les environnements virtuels. Ce concept multidimensionnel est considéré comme la capacité des individus à adopter un comportement similaire à celui de la vie de tous les jours et par conséquent leur propension à réagir aux divers stimuli comme s'ils étaient réels [Slater et al., 2009]. La présence peut également se définir comme la conséquence psychologique, perceptive et motrice de l'*immersion*. Bien que d'autres facteurs aient également la capacité de faire apparaître un sentiment de présence, on considère généralement que l'immersion (*i.e.*, caractéristiques liées à la technologie ; Mestre et Fuchs,

2006; Slater et Wilbur, 1997) en constitue un des facteurs principaux. Dans ce contexte, nous proposons d'utiliser ce concept de présence pour évaluer la validité du simulateur moto MSIS-IBISC-IEF (projet européen SIMACOM, partenaire INRETS, EVRY-UNIV, PARIS-SUD), qui sera référencé dans la suite de ce manuscrit, par convention, en tant que simulateur IFSTTAR. Concrètement, il s'agit (1) de configurer de manière optimale les caractéristiques immersives et interactives du simulateur liées au mouvement de roulis afin de produire une sensation de conduite 'naturelle', et (2) d'évaluer de manière plus globale la validité du simulateur à travers des mesures objectives et subjectives du sentiment de présence. L'objectif visé par cette thèse est ainsi d'étudier les liens entre *immersion* et *présence* pour la mise au point et la validation d'un simulateur de deux-roues motorisé.

### **Plan de lecture du manuscrit**

Ce manuscrit comporte trois sections principales :

**Le cadre théorique** se décompose en quatre chapitres. Le *premier chapitre* précisera le contexte dans lequel se situe ce travail de thèse en dressant un panorama de l'accidentologie deux-roues motorisé. Le *second chapitre* sera consacré à la description des principaux organes sensoriels sollicités et des mécanismes mis en jeu pour percevoir son mouvement dans l'espace, et plus particulièrement lors d'une inclinaison en roulis sur route et sur simulateur. Le *troisième chapitre* présentera l'architecture commune aux simulateurs de conduite puis les singularités des différents simulateurs moto existants. Enfin, le *quatrième chapitre* abordera le concept de validité, en précisant ce concept, en exposant les approches utilisées pour évaluer la validité des simulateurs de conduite, et en décrivant les travaux de validation des simulateurs moto disponibles. Le cadre théorique sera suivi d'une synthèse de l'état de l'art qui introduira la problématique de recherche de notre travail ainsi que la partie expérimentale.

**La contribution au plan expérimental** se compose de sept chapitres correspondant aux sept expérimentations menées au cours de cette thèse. Pour chacune d'elles, une brève introduction permettra de rappeler la problématique de recherche. Après avoir décrit les procédures expérimentales mises en œuvre, les résultats obtenus seront détaillés puis discutés.

**La discussion générale** fera enfin une synthèse des résultats obtenus et les limites de nos travaux seront discutées. Cette discussion sera accompagnée des perspectives de recherche que soulève ce travail.

# Chapitre 1

## Deux-roues motorisé et accidentologie : un phénomène d'ampleur

Au cours de cette première partie, nous dresserons un panorama succinct de l'accidentologie des deux-roues motorisés (comprenant cyclomoteurs et motocyclettes, dont la cylindrée est supérieure à 125 cm<sup>3</sup>), en nous intéressant plus particulièrement à l'accidentologie en moto. Puis nous exposerons les principaux facteurs explicatifs de cette vulnérabilité présentés dans la littérature. Enfin, nous tenterons de décrire les principales solutions pouvant être envisagées afin de remédier à cette sinistralité.

### 1.1 Les grands traits de l'accidentologie en deux-roues motorisé [ONISR, 2010]

La sinistralité des deux roues-motorisés constitue un important enjeu de santé publique dans l'Union Européenne en raison d'une proportion moyenne de 14,4 % d'usagers tués alors que ce mode de transport ne représente qu'une faible part du trafic routier (1 à 15 % selon les pays). En considérant le cas particulier de la France, nous pouvons constater que le territoire français compte d'ailleurs parmi les trois pays où cette proportion d'usagers de deux-roues motorisé est nettement supérieure à la moyenne européenne, avec une proportion d'usagers tués élevée de plus de 25 %. Il existe ainsi un « sur-risque » sur le territoire français en comparaison aux autres territoires européens.

Alors que cette population d'usagers a longtemps été considérée comme une population marginale, elle tend ces dernières années à se développer de plus en plus avec une progression du parc des motos circulant dans le trafic routier de plus de 30 % en sept ans. Néanmoins, les motos ne semblent représenter que 1 % du trafic des véhicules motorisés. Mais, malgré cette faible représentation, une personne tuée sur cinq en 2009 était un motocycliste.

Contrairement aux autres catégories d'usagers, une hausse significative de la mortalité routière des usagers de deux-roues motorisé (+ 9,3 % en 2009) avec 115 personnes tuées est soulignée par l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière [ONISR, 2010] alors que la tendance générale est à la baisse pour les autres catégories d'usagers avec une diminution de près de 4 % du nombre de personnes tuées sur la route en 2009. Cette nette hausse pour les usagers de deux-roues motorisé est

principalement concentrée sur la catégorie d'usagers de moto qui compte 84 personnes décédées en 2009 (soit une hausse de 13,3 % de la mortalité routière). De plus, un indicateur éloquent de cette vulnérabilité comparé aux autres modes de transport est le risque d'être tué au kilomètre parcouru, qui est pratiquement 25 fois supérieur en moto qu'en voiture.

Enfin, cette sinistralité des usagers de moto n'est pas uniformément répartie sur l'ensemble du territoire. En effet, la majorité de l'accidentologie moto se concentre sur deux régions : la région Provence Alpes Côte-d'Azur et la région Ile-de-France, qui représentent à elles seules près de 60 % de l'ensemble des accidents de motocyclistes. Dans la région parisienne, deux tiers des accidents corporels (63 %) de la circulation impliquent des usagers de deux-roues motorisé. De plus, ces derniers représentent à Paris plus de la moitié (près de 5000 individus, soit 54 %) des victimes de la circulation dont la plus grande proportion est constituée par les usagers de moto (3244 victimes). Il semble ainsi que parmi l'ensemble des usagers de la route, les plus vulnérables sont sans conteste les usagers de deux-roues motorisé, sans oublier les piétons [ODP, 2010]. Enfin, il est également important de noter que le « sur-risque » de cette catégorie d'usagers touche principalement les conducteurs âgés de 25 à 44 ans, et ceux conduisant plutôt des motos de grosse cylindrée (plus de 125 cm<sup>3</sup>) [ONISR, 2010].

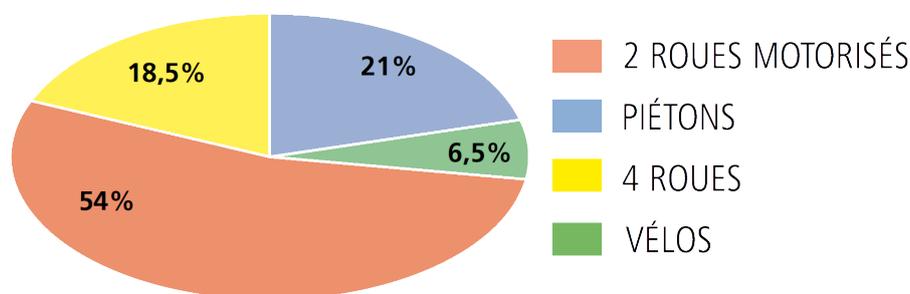


FIGURE 1.1 – Répartition des victimes de la circulation en région parisienne en 2009, par catégorie d'usagers. Extrait de ODP [2010]

## 1.2 Les facteurs explicatifs

Divers facteurs potentiels peuvent apparaître comme à l'origine du sur-risque moto. Tout d'abord, les caractéristiques structurelles de ce mode de transport peuvent être vues comme un facteur aggravant ce sur-risque. En effet, les deux-roues motorisés sont généralement sans habitacle impliquant alors directement le corps du motocycliste en cas de collision. Différentes causes possibles des accidents impliquant les usagers de deux-roues motorisé sont suggérées par l'ONISR [2010], comme la vitesse pratiquée. En effet, malgré une baisse des dépassements de vitesse de plus de 10 km.h<sup>-1</sup> depuis 2002, l'ONISR [2010] souligne que ces dépassements sont deux fois plus fréquents chez les motocyclistes (avec un taux de dépassement de 24 %) que chez les automobilistes (taux de 10 %). Comme pour les automobilistes où les effets négatifs de la consommation d'alcool sont reconnus comme source accidentogène, plus de 20 % des motocyclistes impliqués dans un accident mortel avaient une alcoolémie supérieure au taux légal (0,5 g/l).

Le comportement des usagers n'est pas forcément la source unique de la sinistralité de cette catégorie d'usagers. En effet, les infrastructures routières non spécifiquement adaptées (plaques d'égouts, bandes rugueuses, chaussée dégradée) peuvent être responsables de chutes [Haworth et al., 1997; Amans et Moutreuil, 2005]. La cohabitation avec les autres usagers, en particulier avec les automobilistes, constitue également une cause reconnue de l'accidentologie moto. En effet, on constate une grande difficulté

pour les automobilistes de détecter les deux-roues en raison à la fois de la taille des véhicules et du comportement de leur usagers (e.g., remonter de file ; ONISR, 2010). Toutefois, malgré une accidentologie croissante et élevée des motocyclistes, le nombre d'études approfondies de terrains renseignant sur les comportements des motocyclistes et leurs interactions avec les autres usagers de la route reste très limité malgré la nécessité confirmée de recueillir de telles informations [Aupetit, 2010].

### 1.3 Les solutions envisagées

En raison de cette forte accidentologie, différents outils de sécurité ont été mis en place. Bien que les campagnes de prévention (lutte contre l'alcoolémie, et l'utilisation de téléphone portable au volant ou la prise de médicaments) soient de plus en plus fréquentes, ces dernières ne ciblent généralement que les automobilistes et préférentiellement les novices. A l'opposé, la politique de répression, ciblant l'ensemble des usagers, s'est vu renforcée avec le développement des radars automatiques et des contrôles de plus en plus systématiques du taux d'alcoolémie ainsi que de la consommation de substances psychotropes. Ces actions contribueraient ainsi à diminuer de manière sensible le nombre d'accidents [ONISR, 2010]. En parallèle, on peut également constater que l'essentiel du développement de nouvelles technologies (e.g., limiteur de vitesse, aide au freinage d'urgence, système de freinage ABS) est consacré aux véhicules automobiles. On peut noter toutefois l'existence d'un projet européen (SAFERIDER, 2008-2010) sur la question du développement de systèmes d'information et d'alerte adaptés aux deux-roues motorisés. Ceci témoigne ainsi d'un début d'intérêt porté au développement de telles aides destinées à ces usagers. D'autres leviers d'amélioration de la sécurité commencent à émerger avec pour objectif de diminuer la gravité des accidents. De nombreux systèmes de sécurité passive existent d'ores et déjà pour les véhicules automobiles (la ceinture de sécurité, système airbags, renforts latéraux) ; ils commencent à être commercialisés ou en développement pour les deux-roues motorisés, comme l'adaptation des airbags ou encore des gilets gonflables qui peuvent se déclencher par fil ou par ondes radio lors d'une collision ou chute.

Enfin, le recours à de nouvelles technologies telles que la réalité virtuelle, est de plus en plus fréquent ces dernières années, que ce soit dans le domaine de la formation, de l'évaluation des compétences et de la recherche. Pour cette dernière, ces technologies offrent de nouvelles opportunités et de nouvelles solutions pour appréhender le comportement humain. En ce qui concerne la sécurité routière, les simulateurs de conduite constituent une alternative pour répliquer des scénarios de conduite réelle en environnement virtuel, permettant une pratique sécurisée pour le conducteur dans des conditions qui pourraient s'avérer « à risque » en situation réelle. Ces simulateurs de conduite peuvent constituer à terme une aide à la formation initiale et continue des conducteurs en les exposant à des situations de conduite variées, contrôlées et sécuritaires ainsi qu'à l'étude du comportement des usagers de deux-roues motorisé (projet ANR SIM2CO+, 2011-2013).

Pour répondre à cet objectif, simuler la conduite d'un deux-roues motorisé implique, avec l'objectif particulier d'appréhender le comportement humain et les processus sous-tendant ces comportements, de générer la « bonne » illusion en fournissant les stimuli sensoriels nécessaires et suffisants pour l'activité de conduite. Une synthèse des principaux capteurs sensoriels de l'être humain et des mécanismes régissant la perception du mouvement propre est donnée dans le chapitre suivant (chapitre 2).



## Chapitre 2

# Perception du mouvement propre

La perception du mouvement propre repose sur un processus d'intégration d'informations sensorielles variées issues de différentes modalités : visuelle, vestibulaire et somesthésique principalement. Cette intégration se fait grâce à la mise en relation des diverses informations sensorielles malgré leurs natures différentes. Pour s'orienter dans l'espace, les individus peuvent se reposer sur différents cadres de référence, centrés sur une référence externe ou une référence au corps. Toutefois, comme les informations sensorielles sont généralement redondantes dans l'environnement quotidien, les individus ont plutôt tendance à s'appuyer sur un seul de ces cadres de référence (dit préférentiel). Les trois principaux référentiels spatiaux sont détaillés dans la section suivante, suivi de la description des trois systèmes sensoriels qui sont impliqués avec les référentiels spatiaux dans la perception du mouvement dans l'espace : le système visuel, vestibulaire et somesthésique. Puis, le processus d'intégration des informations multisensorielles (issues des trois systèmes sensoriels) par le cerveau, produisant une perception unifiée et cohérente de l'orientation dans l'espace, sera brièvement décrit. Enfin, une comparaison des mécanismes physiologiques mis en jeu lors d'inclinaisons en roulis produites en laboratoire, sur route et sur simulateur sera présentée et discutée.

### 2.1 Les cadres de référence de l'orientation spatiale

Les cadres de référence sont essentiels pour la spécification de la position, de l'orientation et du mouvement des objets et de son propre corps dans l'espace, par le cerveau. Selon Klatzky [1998], un cadre de référence constitue ainsi un moyen de représenter les localisations d'entités dans l'espace. On peut distinguer dans un premier temps les référentiels centrés sur le corps, dits référentiels '*égocentrés*', de ceux basés sur une référence extérieure/externe au corps (référentiels *allocentrés* ou *exocentrés*). Les référentiels égocentrés codent ainsi les relations entre les objets et le propre corps du sujet en rapportant tout à soi, c'est-à-dire l'estimation de la distance et l'angle des objets est réalisé seulement par rapport à son corps. Alors que ce codage permet d'estimer les relations entre les éléments de l'environnement et soi-même, les référentiels allocentrés permettent d'estimer les relations de différents éléments de l'environnement entre eux ou par rapport à une référence extérieure au corps. Il n'y a alors aucune référence à soi. Alors que le codage égocentrique semble possible chez la plupart des animaux, le codage allocentrique est présent uniquement chez certains primates et chez l'homme [Berthoz, 1997]. Par ailleurs, Berthoz [1997] précise que ce codage allocentrique n'apparaît que tardivement chez l'enfant qui rapporte d'abord l'espace à son propre corps. Parmi ces référentiels précédemment cités, on peut noter trois principaux référentiels impliqués dans l'orientation spatiale, les référentiels *visuel*, *gravitaire* et *idiotropique*

(axe Z ou vertical du corps).

**Le référentiel visuel** Il constitue un référentiel allocentrique qui s'organise autour des informations statiques (e.g., indices de polarité - haut/bas - des objets ou infrastructures) disponibles dans l'environnement ou des informations relatives à la cinématique des mouvements extraites du flux optique.

**Le référentiel gravitaire** Il s'agit également d'un référentiel lié à l'espace extérieur (allocentré). Ce référentiel a la particularité par rapport aux autres référentiels d'être présent en permanence puisqu'il se définit par l'accélération de la gravité et constitue ainsi la verticale physique. Selon Howard [1982] ce référentiel est des plus importants car il contribuerait à l'alignement des différents systèmes de coordonnées utilisés par le système nerveux central. La gravité constitue un invariant de l'espace terrestre, c'est à la fois une constante en grandeur et en direction par rapport à la surface de la Terre [Berthoz, 1997]. La gravité peut être mesurée par des récepteurs du système vestibulaire, les organes otolithiques, dont le fonctionnement biomécanique leur fournit une telle spécialisation. Il semblerait que ce soit au cours d'expériences conduites en centrifugeuse que ce référentiel impliqué dans l'orientation spatiale a été mis en évidence (référence de l'étude non précisée ; Pinto, 2007), les individus ayant ainsi tendance à aligner la verticale subjective avec la résultante de la gravité et de l'accélération (force gravito-inertielle).

**Le référentiel idiotropique (axe Z)** Il s'agit d'une référence spatiale centrée sur l'axe allant des pieds à la tête, nommée axe Z. Selon Berthoz [1997], il s'agirait d'une perception innée de l'axe longitudinal du corps chez l'homme. Ce référentiel fait ainsi partie des référentiels égocentrés et a été mis en évidence lors d'études de la perception de la verticale [Mittelstaedt, 1983].

Aux trois référentiels spatiaux peuvent correspondre trois modalités sensorielles impliquées dans la perception du mouvement propre et de manière plus générale dans l'orientation : les systèmes visuel, vestibulaire et somesthésique. Afin de mieux appréhender la perception du mouvement propre, le fonctionnement de ces trois modalités sensorielles est rappelé dans les sections suivantes.

## 2.2 Le système visuel

Cette partie porte sur les mécanismes visuels sous-tendant la perception du mouvement propre. Une brève description de l'organisation fonctionnelle du système visuel et de la nature de l'information transmise, par la rétine au cerveau, est présentée. Enfin, les différentes voies de traitement acheminant l'information visuelle centrale et périphérique au sein des structures corticales sont rappelées.

### 2.2.1 Mécanisme de la perception visuelle : de la rétine au nerf optique...

Suite au franchissement des différents éléments réfractaires tels que la cornée, l'humeur aqueuse, le cristallin et le corps vitré, les particules de lumière (photons) doivent traverser toutes les couches neuronales de la rétine avant d'accéder aux segments externes des photorécepteurs attenants à la couche d'épithélium pigmentaire (figure 2.1). Il existe deux types de photorécepteurs : les cônes et les bâtonnets. La répartition entre ces deux photorécepteurs varie en fonction de la surface rétinienne. Les bâtonnets, majoritaires (100 millions), prédominent au niveau de la rétine périphérique et sont quasiment absents de la région fovéale, alors que les cônes (5 millions) prédominent dans la région centrale (fovéale) tout en restant présents sur l'ensemble de la surface rétinienne [Imbert, 1988; Rodieck, 2003].

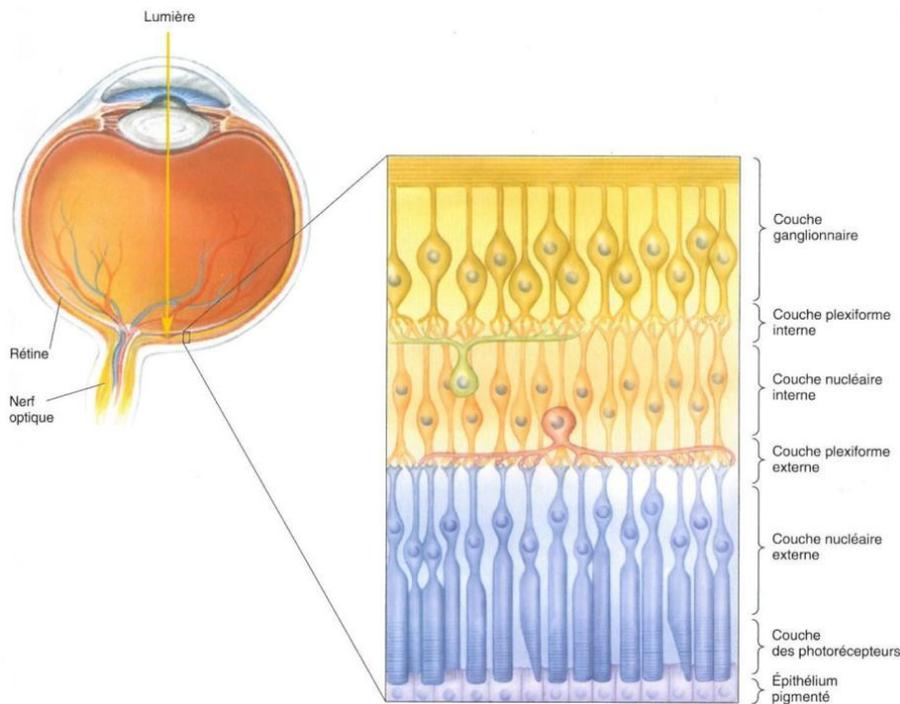


FIGURE 2.1 – Organisation laminaire de la rétine. D'après, Bear et al. [2006]

Seul le segment externe des photorécepteurs est sensible à la lumière. En effet, ce segment contient des molécules pigmentaires photosensibles, appelés *opsine*. La conversion (transduction) de l'énergie lumineuse en variation de potentiel de membrane commence par l'absorption de photons par l'opsine. Cette absorption, en activant le pigment photosensible, va le faire changer de forme et le transformer sous sa forme active. Il va s'en suivre un ensemble de réactions biochimiques qui vont permettre à l'information nerveuse d'être transmise via les terminaisons synaptiques des photorécepteurs aux cellules bipolaires de cônes (10 types) ou de bâtonnets (1 type), ou encore transiter avant par les cellules horizontales qui s'agencent transversalement sur la couche nucléaire interne [Boycott et Wässle, 1991; Kolb et al., 1992; Mariani, 1983]. Certaines cellules bipolaires, en particulier les cellules bipolaires de bâtonnets, vont d'abord établir un contact synaptique avec des cellules amacrines qui vont moduler le signal avant de le transmettre aux cellules ganglionnaires. Les cellules amacrines forment une route alternative indirecte entre les cellules bipolaires et les cellules ganglionnaires [Kolb, 1979; Kolb et Famiglietti, 1974]. Les cellules ganglionnaires sont les seules cellules à transmettre l'information neurale au cerveau en générant des potentiels d'action de façon spontanée. Les axones des cellules ganglionnaires constituent les fibres du nerf optique [Imbert, 1988; Rodieck, 2003]. Les cellules ganglionnaires peuvent être classées selon la taille de leur corps cellulaire ou encore l'étendue de leur arborisation dendritique. Ces critères ont permis de distinguer trois types de cellules à l'origine de trois systèmes parallèles de traitement de l'image [Imbert, 1988], le premier sensible aux caractéristiques spatiales, le second sensible aux caractéristiques temporelles, et le troisième sensible aux coloris :

- (i) Les *cellules P* sont nombreuses en région fovéale (centre de la rétine) mais restent présentes sur l'ensemble de la rétine (représentant 90 % des cellules totales). Les fibres de ces cellules se terminent sur la couche parvocellulaire du corps genouillé latéral [Kolb et al., 1992; Rodieck et al., 1985]. Ces cellules P formant la *voie Parvocellulaire (P)* permettent une grande acuité visuelle, sont sensibles aux caractéristiques spatiales, en étant particulièrement impliquées dans **l'analyse de la**

**forme et de détails fins d'objets** se déplaçant lentement. Cette voie P semble aussi jouer un rôle dans la détection des couleurs [Bear et al., 2006].

- (ii) Les *cellules M* sont majoritaires en rétine périphérique (bien qu'elles ne représentent que 5 % de la totalité des cellules ganglionnaires). Elles possèdent une grande sensibilité à la lumière [Kaplan et Shapley, 1986] mais perdent en précision du fait qu'une cellule M reçoit des afférences de plusieurs cellulaires bipolaires, elles-mêmes recevant des afférences de nombreux photorécepteurs. Les fibres de ces cellules se terminent sur la couche magnocellulaire du corps genouillé latéral [Dacey et Lee, 1994; Imbert, 1988] et forment ainsi la *voie Magnocellulaire (M)*. Cette voie est impliquée dans **l'analyse de la détection du mouvement** grâce à une analyse temporelle élevée en traitant la position, la direction et la vitesse d'objets en mouvement [Purves et al., 2005].
- (iii) Les *cellules W (ou de type non P et non M)* forment la *voie koniocellulaire (K)*, appelée également le canal des tâches [Bear et al., 2006; Imbert, 1988; Purves et al., 2005]. On ne connaît pas l'entière contribution de cette voie à la perception, toutefois il est reconnu que cette voie K est impliquée dans la vision des couleurs en analysant les couleurs des objets grâce à ses neurones sensibles à différentes longueurs d'ondes.

L'ensemble des différentes étapes de transmission de l'image oculaire entre les différents neurones reflète bien le fait que la rétine simplifie cette image en un ensemble d'informations sur l'organisation du stimulus lumineux, avant de la transmettre aux fibres du nerf optique puis au cerveau. L'image est ainsi «codée en une représentation neurale réduite» [Imbert, 1988] afin que le million de fibres constituant le nerf optique puissent transmettre l'image oculaire, qui a été codée par plus de 100 millions de photorécepteurs, aux structures corticales et sous corticales qui sont présentées ci-dessous.

## 2.2.2 Du nerf optique à la voie optique primaire : la perception visuelle consciente

Les axones des cellules ganglionnaires quittent la rétine par la papille optique, *i.e.*, la région circulaire où les axones des cellules ganglionnaires se regroupent en un faisceau optique pour former le nerf optique. Les différentes classes de cellules ganglionnaires se projettent sur diverses cibles. Une partie des fibres rejoignent des structures appelées sous-corticales, formant la voie optique secondaire comme le noyau suprachiasmatique de l'hypothalamus, le prétectum, le pulvinar, le colliculus supérieur ou encore les noyaux du système optique accessoire. Cependant, la majorité des fibres se projettent sur les différentes couches du **corps genouillé latéral (CGL)**, puis de celui-ci vers le cortex strié visuel, appelé aussi le cortex visuel primaire (V1 ou Aire 17 de Brodmann), empruntant la *voie optique sensorielle primaire*, connue également sous le terme la *voie rétino-géniculo-striée*, qui est responsable en grande partie de la perception visuelle consciente [Purves et al., 2005]. L'information, une fois traitée par le cortex visuel primaire est transférée dans des aires associatives ou extrastriées où l'analyse sera plus approfondie. Les différentes aires corticales semblent spécialisées chacune dans le traitement d'une propriété donnée [Imbert, 1988]. En effet, chacune code et traite seulement certains aspects spécifiques de l'image visuelle. Ces aires extrastriées peuvent être divisées en deux voies principales [Purves et al., 2005] : la voie ventrale et la voie dorsale.

**La voie ventrale** appelée aussi la voie du « Quoi », transporte les informations relatives à la forme, couleur et identification des objets [Zeki, 1980]. Elle reçoit principalement les informations des voies parvocellulaire et koniocellulaire qui vont suivre ainsi un trajet ventral à partir de l'aire V2, passant par l'aire V4, pour aboutir au cortex temporal inférieur. Les neurones de ce cortex répondent sélectivement à des parties d'objets voir des objets entiers et certains neurones sont capables de répondre à des stimuli

complexes comme la reconnaissance de visages humains [Perret et al., 1991]. Cette voie semble ainsi être impliquée dans la **représentation consciente de l'identité des objets** (reconnaissance des objets).

**La seconde voie, dorsale** appelée aussi la voie du « Où », transporte les informations relatives au mouvement. Il s'agirait également la voie de l' « action » grâce à l'intégration des relations spatiales entre le corps et l'environnement. La voie dorsale reçoit les informations essentiellement relatives à la voie magnocellulaire qui prend, à partir de l'aire V2, une direction dorsale pour atteindre successivement l'aire V3, et le cortex pariétal avec l'aire Médio-Temporale MT appelée aussi l'aire V5, l'aire Médio-Temporale Supérieure (aire MST), avant d'aboutir aux aires Intra-Pariétales Ventrale et Latérale (VIP et LIP) et aire 7a. Cette voie est à l'**origine de la perception visuelle du mouvement de soi** [Bremmer et al., 2002; Gu et al., 2006] **et des objets** [Sakata et al., 1997]. En effet, l'aire MT, avec son organisation en colonne d'orientation, est dédiée spécifiquement au traitement du mouvement [Maunsell et Van Essen, 1983]. Les neurones de l'aire MT détectent ainsi le mouvement dans toutes les directions aussi bien le mouvement se dirigeant vers le corps que ceux qui s'en éloignent [Howard et al., 1996]. En plus d'être sensible au déplacement linéaire comme l'aire MT, les cellules de l'aire MST répondent sélectivement pour des configurations complexes de mouvement du flux optique (rotation, expansion, mouvement en spirales) [Duffy et Wurtz, 1991; Saito et al., 1986] et seraient ainsi spécialisées dans le codage du flux optique dans sa globalité [Anderson et Siegel, 1999; Lappe, 1997; Smith et al., 2006]. Les neurones de l'aire MST semblent également impliqués dans le contrôle visuel des mouvements du corps [Duffy et Wurtz, 1996] et être influencés par des signaux vestibulaires relatifs au mouvement de soi (propre), de telle manière qu'ils puissent alors différencier entre le flux optique créé par le mouvement de soi, de celui induit par le déplacement d'objet dans l'environnement visuel [Duffy, 2000].

L'ambiguïté majeure du flux optique (*i.e.*, savoir si c'est l'observateur qui bouge ou si ce sont les objets qui bougent par rapport à l'observateur) est ainsi résolue par une interaction visuo-vestibulaire dans l'aire MST. De plus, les travaux de Beauchamp et ses collègues [2007] indiquent l'existence de réponses somatosensorielles au niveau de l'aire MST et non au niveau de l'aire MT. L'aire VIP apparaît également être sensible non seulement au flux optique mais semble également intégrer des informations vestibulaires et somatosensorielles relatives à la tête [Anderson et Siegel, 1999; Bremmer et al., 2002; Lewis et van Essen, 2000]. Par ailleurs, plusieurs travaux montrent l'importance de la contribution de l'aire MST et VIP dans la perception du mouvement propre et dans l'orientation visuo-spatiale [Britten, 2008; Duffy, 2000; Gu et al., 2008; Kleinschmidt et al., 2002]. Par conséquent, les aires MST et VIP semblent constituer des aires de convergences multisensorielles, recevant des informations visuelles, vestibulaires et également somatosensorielles. Finalement, de nombreux travaux de recherche semblent fournir plusieurs preuves empiriques que le cortex pariétal combine et intègre des informations provenant de multiples sources sensorielles (*e.g.*, visuelles, auditives, position de la tête, de l'œil, vestibulaires, proprioceptives) afin de faire émerger une représentation de l'espace unifiée pouvant être utilisée pour guider les mouvements dans l'espace [Andersen et al., 1997; Lewis et van Essen, 2000].

### 2.2.3 Conclusion

L'analyse du fonctionnement du système visuel met en exergue l'existence de différences entre la vision centrale (fovéale) et celle périphérique, que ce soit au niveau des photorécepteurs, des cellules ganglionnaires ou des voies de traitement corticales. En effet, la rétine centrale riche en cônes et en cellules P est impliquée dans la détection des couleurs et dans l'identification des objets (analyse de la forme

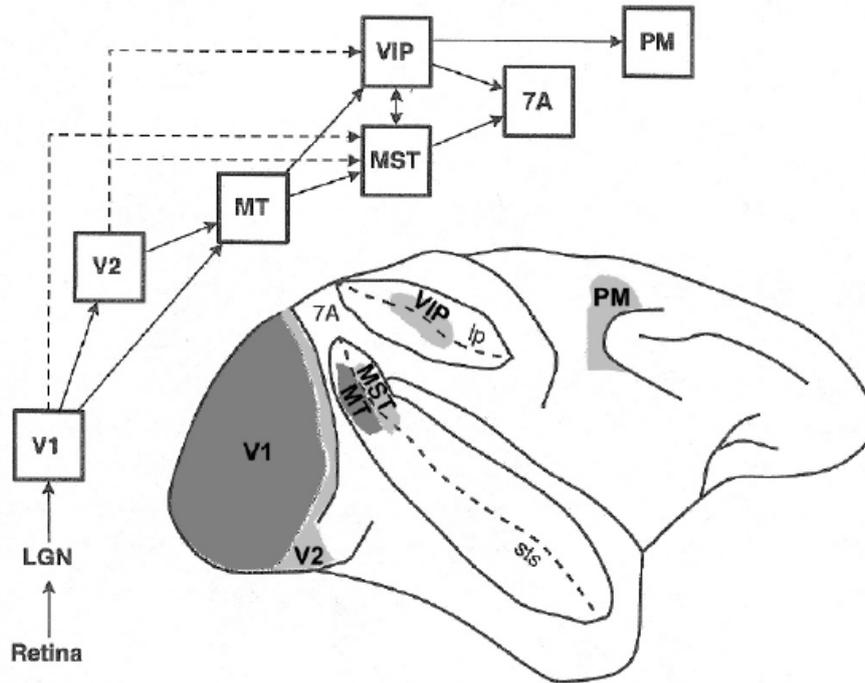


FIGURE 2.2 – Schéma simplifié des aires corticales de la voie dorsale (chez le primate). Extrait de Bremmer et al. [2000]

et des détails fins), permettant ainsi une grande acuité visuelle. En revanche, la vision périphérique repose sur la présence de nombreux bâtonnets et de cellules M au niveau de la rétine ; elle joue ainsi un rôle prépondérant dans la perception du mouvement et de la vitesse. De plus, alors que les informations provenant des cellules P de la rétine centrale sont véhiculées principalement au niveau de la voie ventrale (voie du « Quoi ») de la voie optique primaire avant d'atteindre le cortex temporal inférieur, les informations provenant des cellules M sont quant à elles reçues au niveau de la voie dorsale (voie du « Où » ou « de l'action ») avant de terminer dans le cortex pariétal, où convergent des afférences multi-sensorielles. On peut retenir également que l'information rétinienne provient du mouvement des objets dans l'environnement par rapport à la rétine elle-même. Ainsi, la même information sera reçue si l'origine du mouvement provient de l'individu (déplacement de la rétine) ou de l'environnement (déplacement des objets). Par conséquent, l'information rétinienne présente une ambiguïté en raison de l'origine de ce mouvement. C'est cette ambiguïté qui produit dans certaines situations (*e.g.*, lorsque le train dans lequel nous nous trouvons est arrêté et que celui adjacent se met en marche) une illusion de mouvement propre induite uniquement visuellement. On appelle cette illusion une vexion optocinétique. Ce phénomène de vexion est essentiel pour la conduite simulée en raison des déplacements réels limités des simulateurs. Néanmoins, cette ambiguïté de l'information rétinienne peut être résolue par l'apport d'autres informations sensorielles comme celles provenant du système vestibulaire.

### 2.3 Le système vestibulaire

Bien que la vision soit le sens prédominant lors de la conduite d'un véhicule, ce sens n'est pas le seul sollicité. Le système vestibulaire l'est lui aussi et, contrairement au système visuel que l'on peut

interrompre en fermant les yeux, les informations provenant du système vestibulaire sont délivrées en continu, sans interruption possible. A ce jour, ce système sensoriel demeure le moins reconnu et négligé parmi les cinq sens les plus connus [Merfeld, 2009], ceci peut-être car nous prenons conscience de son existence et des effets du fonctionnement de ce système que lorsque son mécanisme est perturbé. Situé dans l'oreille interne, le système vestibulaire contribue de manière importante et essentielle à différentes réponses motrices réflexes pour stabiliser le regard pendant les mouvements de la tête mais aussi le tonus musculaire. Ceci fait de lui un assistant primordial pendant la marche et la station debout [Benson, 1982]. Il aide ainsi à maintenir l'équilibre postural et participe, en conjonction avec les informations visuelles et somesthésiques, à la perception du mouvement propre et à l'orientation [Goldberg et Fernández, 1984; Merfeld, 2009]. Le labyrinthe membraneux (figure 2.3) est composé de deux types de récepteurs qui ont une anatomie et fonctionnalité différente : (i) les canaux semi-circulaires captent les mouvements de rotation de la tête (accélération angulaire) ; (ii) les organes otolithiques, utricule et saccule, perçoivent les déplacements linéaires (accélération linéaire) ou les inclinaisons de la tête par rapport à la gravité. Une description du fonctionnement des canaux semi-circulaires puis des organes otolithiques est rappelée dans les sections suivantes afin de mieux comprendre leur rôle dans la perception du mouvement propre.

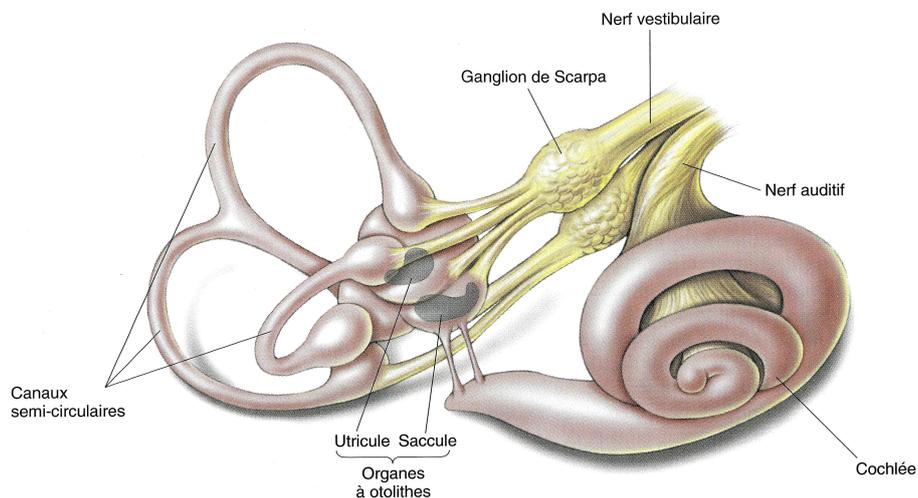


FIGURE 2.3 – Vue d'ensemble de l'oreille interne constitué du labyrinthe membraneux (canaux semi-circulaires et organes à otolithes ou otolithiques) et de la circonvolution en spirale de la cochlée (organe de l'audition). D'après, Bear et al. [2006]

## 2.3.1 Les canaux semi-circulaires

### 2.3.1.1 Description anatomique et physiologique

Les canaux semi-circulaires (CSC) ont la forme d'un anneau rempli d'un fluide, l'endolymphe. Ils sont au nombre de trois, de chaque côté de la tête et sont alignés pour former un système coordonné : un CSC horizontal situé environ à 30° du plan horizontal de référence [Colin et Lienhart, 1999] et deux CSC verticaux, un CSC vertical postérieur et un CSC vertical antérieur qui sont disposés dans le plan vertical et forment un angle de 45° avec le plan sagittal [Colin et Lienhart, 1999; Goldberg et Fernández, 1984]. Les CSC sont ainsi orthogonaux les uns des autres. De plus, chaque canal est coplanaire avec son partenaire synergique de l'autre côté de la tête. Par symétrie, lorsqu'un canal est stimulé, l'autre est inhibé. Le cerveau interprète alors le mouvement angulaire de la tête par la différence dans les réponses

des canaux synergiques [Howard, 1986]. Cette organisation, appelée « push/pull system » ou « couple inhibé/stimulé », des paires coplanaires présente de nombreux avantages comme celui de fournir une redondance sensorielle ou encore améliorer le rapport signal à bruit du système [Hain et al., 2000; Howard, 1986]. Finalement, les canaux sont capables d'identifier des mouvements angulaires provenant des 3 axes (x, y, z), soit les 3 dimensions de l'espace, permettant de détecter des mouvements en tangage, roulis ou lacet (figure 2.4).

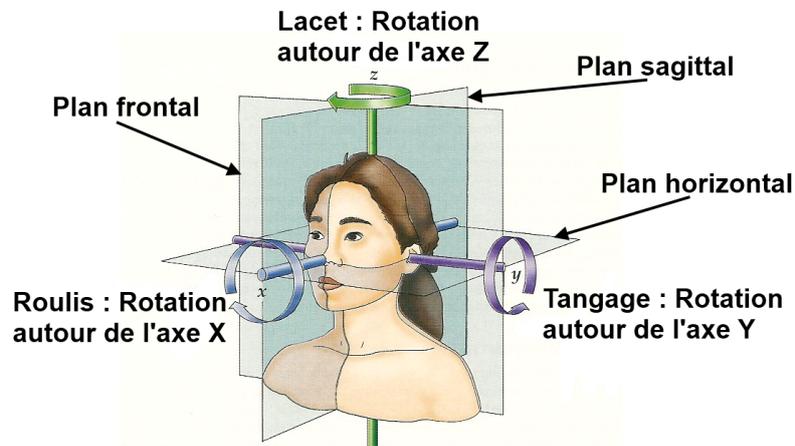
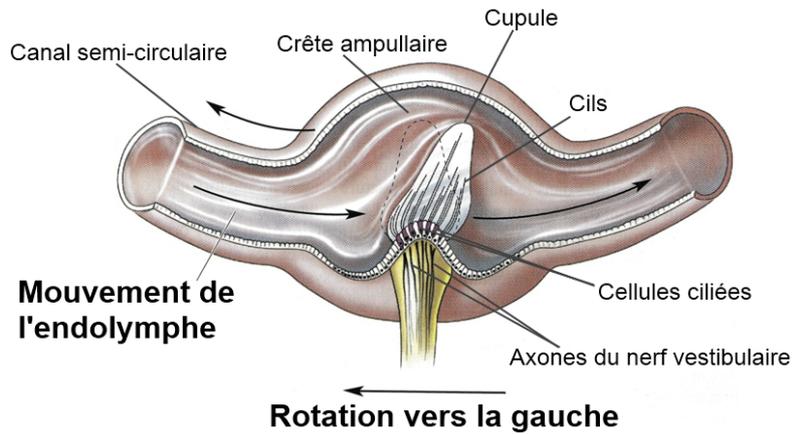


FIGURE 2.4 – Principaux plans et axes de rotation du corps humain. D'après, Purves et al. [2005]

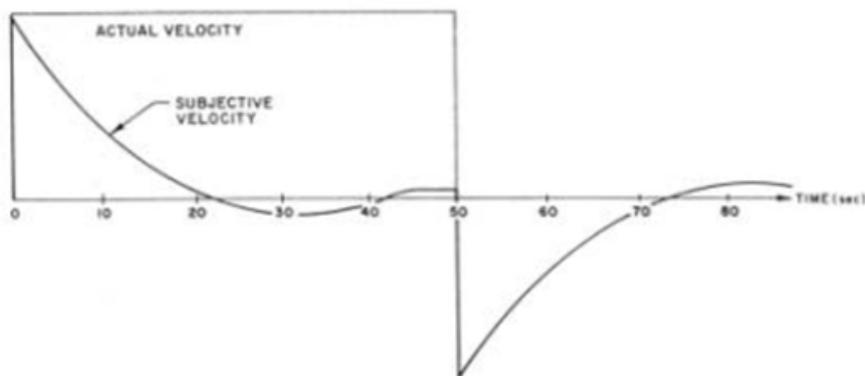
Chaque canal présente, proche de la jonction utriculaire, une zone renflée qui forme l'ampoule. Celle-ci contient un épithélium sensoriel appelé la crête ampullaire qui contient de nombreuses cellules ciliées sensorielles et des cellules de soutien. A la surface apicale de chaque cellule ciliée émane un paquet de cils sensoriels appelé stéréocils qui se projettent dans une masse gélatineuse déformable constituée de protéines, la cupule où les cils sont emprisonnés [Fife, 2010] (figure 2.5). Lors d'une accélération de la tête dans le plan du canal, l'inertie de l'endolymphe l'empêche de se déplacer aussi vite que le canal qui le contient, ce qui engendre un mouvement de l'endolymphe en direction opposée à la paroi de la membrane du canal (et du mouvement de la tête). Comme la cavité du canal est très étroite, l'écoulement de l'endolymphe s'effectue seulement selon la direction longitudinale et présente une haute résistance à l'écoulement en raison de sa viscosité importante. Ce mouvement relatif entre l'endolymphe et les parois du canal résulte en la déflexion de la cupule (figure 2.5), dont l'élasticité provoque une résistance au déplacement. Les stéréocils étendus dans la cupule réagissent au déplacement mécanique de la cupule [Fife, 2010], et semblent alors pivoter à leur base en raison de leur raideur [Goldberg et Fernández, 1984]. Par conséquent, cette déformation de la cupule entraîne une flexion des cils dans le sens opposé au mouvement. La courbure des cils provoque une augmentation de la fréquence de décharge des influx nerveux [Colin et Lienhart, 1999].

Cependant, lorsque la rotation de la tête se prolonge à vitesse constante (figure 2.6), la friction entre l'endolymphe et le canal diminue beaucoup ainsi l'endolymphe circule à la même cadence que le canal. Ce phénomène couplé aux propriétés élastiques de la cupule provoque le retour de cette dernière dans sa position de repos. Goldberg et Fernandez [1971] ont modélisé mathématiquement le retour de la cupule en sa position d'origine tel que la constante de temps cupulaire est le temps que prend la cupule pour retourner à 63 % de sa position de repos après une accélération. Ces auteurs ont estimé ce temps à environ 6-7 s chez le singe sagouin alors que d'autres auteurs estiment ce temps plus proche de 15 à 30 s chez l'humain [Benson, 1982; Buser et Imbert, 1982; Colin et Lienhart, 1999]. De plus, Goldberg et Fernandez [1971] mettent ainsi en évidence que les CSC ne sont pas des intégrateurs ou



**FIGURE 2.5** – Vue en coupe de la crête ampullaire c'un canal semi-circulaire : représentation du mouvement de la cupule et de l'endolymphe lors d'une accélération de la tête vers la gauche. D'après, Bear et al. [2006]

détecteurs de vitesse parfaits car ils répondent correctement à la vitesse angulaire seulement pendant quelques secondes (le signal est alors proportionnel à la vitesse). Ensuite, le signal résultant diminue exponentiellement avec le temps, reflétant le lent retour de la cupule à sa position de repos (la fréquence de décharge diminuant de 32 % toutes les 7 s ; Hain et al., 2000; Young, 1984).



**FIGURE 2.6** – Perception de la vitesse angulaire pendant et après une rotation à vitesse constante. On observe une décroissance exponentielle durant la rotation puis une sensation transitoire de rotation dans la direction opposée lors de l'arrêt brutal de la rotation. Extrait de Young [1984]

Comme l'illustre la figure 2.6, une fois la cupule retournée en position de repos la rotation n'est plus perçue ni signalée par les capteurs bien qu'elle existe toujours. Lors de la décélération jusqu'à l'arrêt de la rotation, l'inertie de l'endolymphe va alors déplacer la cupule (déflexion de la cupule) dans la direction opposée à son premier déplacement, soit cette fois-ci dans le sens du mouvement de la tête. Cette déflexion de la cupule entraîne une déflexion des cils dans le même sens, traduite par la personne comme une sensation de rotation en sens inverse : la personne se sent tournée dans la direction opposée au mouvement. Elle peut également se sentir tomber d'un côté ; ses yeux vont bouger en effectuant de nombreux nystagmus et certaines personnes peuvent se sentir nauséuses [Benson, 1982; Colin et Lienhart, 1999; Guedry, 1974]. Ces effets post-rotatoires sont susceptibles de durer quelques minutes même si la cupule est déjà retournée à sa position d'origine (repos) en quelques secondes [Buser et Imbert, 1982; Howard, 1986].

### 2.3.1.2 Spécificités des canaux semi-circulaires

Les canaux semi-circulaires signalent un mouvement de la tête uniquement lorsque l'accélération du mouvement dépasse un certain seuil. Rappelons que bien que le stimulus effectif des canaux semi-circulaires soit l'accélération angulaire, les canaux agissent comme des accéléromètres intégrateurs et qu'ils sont ainsi des détecteurs de vitesse angulaire pour des vitesses de rotation usuelles [Goldberg et Fernández, 1984; Young, 1984]. C'est pourquoi dans la littérature certains auteurs expriment le seuil de détection du mouvement en accélération angulaire (*e.g.*, Hosman et van der Vaart, 1980; Clark, 1967) alors que d'autres auteurs (*e.g.*, Benson et Brown, 1989; Gundry, 1977) utilisent la vitesse angulaire pour exprimer ces valeurs.

Clark [1967] a effectué une revue de littérature très complète en se basant sur un total de 25 études centrées sur le seuil de perception des accélérations angulaires chez l'homme. Les seuils rapportés varient entre 0,035 et 8,2  $\text{deg.s}^{-2}$ , avec une moyenne autour de 1  $\text{deg.s}^{-2}$ . Dans la même optique, Gundry [1978] a indiqué une dispersion des valeurs de seuil de perception de mouvement, exprimées en vitesse angulaire, entre 1,6 et 9  $\text{deg.s}^{-1}$  (sur la base de 7 études). Généralement, on considère que la sensibilité de l'individu est différente selon le mouvement étudié (lacet, tangage ou roulis). En effet, la sensibilité de l'individu à la perception du mouvement de lacet est plus importante que pour les mouvements de tangage ou de roulis. Un mouvement en lacet (stimulation des canaux horizontaux) est détecté à partir d'une accélération moyenne de 0,1-0,2  $\text{deg.s}^{-2}$  [Clark et Stewart, 1970; Meiry, 1965]. Néanmoins Grabherr et al. [2008] ont récemment indiqué que ce seuil dépendait de la fréquence du stimulus. En effet, ce seuil variait de 2,8  $\text{deg.s}^{-1}$  pour 0,05 Hz à 0,4  $\text{deg.s}^{-1}$  pour 2 Hz. Les auteurs ont remarqué également une augmentation du seuil pour 0,2 Hz (seuil de 0,7  $\text{deg.s}^{-1}$ ) et en dessous de cette fréquence, soulignant que cette augmentation du seuil aux basses fréquences reflète les caractéristiques hautes fréquences des canaux semi-circulaires.

En revanche, pour un mouvement en roulis ou tangage (stimulation des canaux verticaux) le seuil moyen indiqué dans la littérature est de 0,5  $\text{deg.s}^{-2}$ , ou de 3,5  $\text{deg.s}^{-1}$  lorsque ce seuil est exprimé en vitesse [Meiry, 1965]. Notons cependant que la majorité des études qui s'est intéressée au seuil de perception du roulis a été menée pour des mouvements autour de l'axe vertical dans un environnement sans lumière [Benson et al., 1989; Clark et Stewart, 1970; Meiry, 1965]. Or, un mouvement autour de l'axe vertical (*i.e.*,  $y$ ) implique des systèmes sensoriels différents que lors d'une rotation autour de l'axe horizontal (*i.e.*,  $x$ ). En effet, quand le mouvement de roulis est produit autour de l'axe vertical (*e.g.*, l'individu est dans ce cas précis allongé sur une table tournante), la détection dépend principalement des canaux semi-circulaires. En revanche, lorsque l'axe du mouvement de roulis est horizontal (*e.g.*, l'individu est alors assis avec le buste droit érigé), le stimulus du canal est accompagné par un changement de l'orientation de l'individu par rapport à l'axe gravitaire. Une telle orientation peut alors être détectée par les gravicepteurs : les organes otolithiques et le système somesthésique. Il apparaît ainsi dans la littérature que la sensibilité au mouvement de roulis est plus élevée (diminution du seuil et réduction du temps de réponse) lorsque ce mouvement est produit autour de l'axe horizontal en comparaison à l'axe vertical [Gundry, 1978]. En parallèle, plusieurs auteurs soulignent également que les valeurs de seuil mesurées sur simulateur de vol diffèrent en comparaison aux mesures obtenues sur d'autres dispositifs comme les tables tournantes. En effet, alors que Benson et al. [1989] a indiqué un seuil en vitesse de 2,04  $\text{deg.s}^{-1}$  pour le mouvement de roulis obtenu sur table tournante, un seuil de détection de seulement 0,12  $\text{deg.s}^{-1}$  a été mesuré sur simulateur de vol [Gundry, 1977]. Bien que cette différence puisse être attribuée également à la stimulation supplémentaire des gravicepteurs comme expliqué précédemment, Gundry [1977] a suggéré que ce seuil très bas était peut-être dû au fait que les participants aient dé-

tecté les accélérations linéaires radiales ou tangentielles en raison de la distance avec l'axe de rotation horizontal. Récemment, Heerspink et al. [2005] ont également souligné qu'en raison de la rotation de l'habitacle du simulateur et de la distance entre l'axe de rotation et la tête du sujet, des forces spécifiques ou accélérations angulaires et tangentielles sont produites, ces forces pouvant influencer les seuils de détection de mouvement. Par ailleurs, Heerspink et al. [2005] ont également montré que les seuils de détection de roulis et tangage dépendaient de la fréquence du stimulus.

Bien que la majorité des études sur les seuils de détection ait été effectuée dans un environnement sans lumière, quelques études se sont intéressées à l'influence de la présence d'informations visuelles sur la sensibilité des individus à la perception de mouvement. Toutefois, ces études ont essentiellement étudié ce facteur d'influence au travers du mouvement de lacet [Benson et Brown, 1989; Benson et al., 1989; Huang et Young, 1981; Stewart, 1970]. Benson et Brown [1989] et Benson et al. [1989] ont montré une diminution significative du seuil de détection de la direction du mouvement et du temps de réponse (temps écoulé entre la présentation du stimulus et la réponse du participant) lors de la présence de diodes électroluminescentes (LED) dans un environnement sans lumière en comparaison à la condition expérimentale où les participants avaient les yeux fermés. Benson et Brown [1989] n'ont en revanche pas indiqué de différence significative sur le seuil de détection entre les deux conditions visuelles testées (LED et illumination de l'ensemble du tableau de bord). Huang et Young [1981] ont mis en évidence des résultats similaires avec un stimulus visuel différent : les participants faisaient face ici à un pattern visuel (composé de bandes verticales fixes) dans le champ visuel périphérique. Ces auteurs ont également manipulé le degré d'illumination de ce pattern visuel. Bien que Huang et Young [1981] ont indiqué un effet significatif de la présence du pattern visuel sur le seuil de détection de la direction du mouvement, le degré d'illumination n'est pas apparu être un facteur d'influence du seuil de détection. De même, Stewart [1970] a rapporté une même diminution du seuil de détection du mouvement lors de la présence d'un cube, illuminé par une lumière ultraviolet, en comparaison à la condition où les participants maintenaient les yeux fermés.

S'intéressant quant à lui au mouvement de roulis, Gundry [1978] a également étudié ce facteur sur le seuil de perception du roulis. Néanmoins, cette étude présente des résultats mitigés concernant l'influence de la présence d'informations visuelles sur le seuil de détection du mouvement de roulis. En effet, Gundry [1978] a étudié les effets de la présence d'une cible visuelle (réticule lumineux comprenant deux cercles concentriques et lignes entrecroisées, l'ensemble sous-tendant un angle de vision de 5 degrés) sur la détection du mouvement en roulis obtenu via un dispositif de table tournante. Selon Gundry [1978], les résultats de cette étude montrent que la présence de la cible visuelle peut altérer la contribution relative faite à la détection du mouvement par les canaux et les gravicepteurs (organes otolithiques et récepteurs somesthésiques). Toutefois, un participant (sur 7) a indiqué se servir de l'inclinaison de la cible visuelle comme d'une aide pour détecter la direction de la rotation. Trois autres participants ont quant-à eux rapporté un mouvement de la cible durant des accélérations de grandes amplitudes, mais seulement après avoir donné leur réponse liée à la détection de la direction du mouvement. Gundry [1978] suggère que la présence d'une cible visuelle n'a ainsi pas un effet systématique sur la capacité des sujets à détecter le mouvement de roulis.

Enfin, l'étude de la littérature sur ce sujet montre que d'autres facteurs sont susceptibles d'influencer les seuils de détection de mouvement tels que la restriction des mouvements du sujet (par l'utilisation d'harnais ; Gundry, 1978) ou encore la charge mentale [Gundry, 1977; Hosman et van der Vaart, 1978]. La consigne de réponse (*e.g.*, perception de tout mouvement ou de la direction du mouvement) influence également par essence le seuil de détection. En effet, le fait de détecter tout mouvement (*e.g.*, Heerspink

et al., 2005) intervient chronologiquement en amont de la détection de la direction d'un mouvement (e.g., Benson et Brown, 1989; Benson et al., 1989; Gundry, 1978; Hosman et van der Vaart, 1978), la difficulté de la tâche étant différente. Toutefois, la majorité des études établissent tout de même des comparaisons entre ces seuils malgré l'implication de tâches chronologiquement distinctes (e.g., Heerspink et al., 2005). L'ensemble de ces facteurs d'influence explique qu'une grande diversité des mesures de seuils de détection de mouvement existe.

Pour conclure, une des propriétés remarquables des canaux semi-circulaires est leur capacité à signaler l'orientation de l'axe de l'accélération angulaire par rapport à la tête, l'amplitude de l'accélération angulaire et le sens de rotation autour de l'axe de l'accélération angulaire [Guedry, 1974]. En revanche, les canaux ne peuvent pas indiquer l'axe de rotation par rapport à la gravité, contrairement aux organes otolithiques, qui agissent par ailleurs comme des inclinomètres.

## 2.3.2 Les organes otolithiques

### 2.3.2.1 Description anatomique et physiologique

Les organes otolithiques, l'utricule et le saccule, sont des cavités ovoïdes remplies d'un liquide visqueux, l'endolymphe, et contiennent un épithélium sensoriel, appelé la macule (macula) qui répond à l'amplitude et la direction de l'accélération linéaire incluant l'amplitude et la direction de la gravité. En effet, les organes otolithiques mesurent une accélération globale, somme de l'accélération de la tête dans le repère terrestre et gravitaire, désigné sous le terme de force gravito-inertielle. Les organes otolithiques sont donc des accéléromètres linéaires et des inclinomètres [Berthoz, 1997; Hain et al., 2000]. Quand la tête est droite, la macule utriculaire est orientée approximativement dans le même plan que les CSC horizontaux et, la macule sacculaire s'étend sur un plan orthogonal à la macule utriculaire incliné de 20 degrés par rapport au plan vertical entre les deux canaux verticaux (e.g., plan y-z). Le saccule mesure ainsi les accélérations linéaires majoritairement verticales alors que l'utricule, dans le plan horizontal, mesure les accélérations linéaires horizontales [Berthoz, 1997; Parker, 1980]. Les organes otolithiques sont ainsi disposés de façon à répondre aux forces linéaires dans les 3 dimensions de la même manière que les canaux pour l'accélération angulaire. En conséquence, l'appareil vestibulaire, dans son ensemble, est capable de détecter l'ensemble des mouvements de la tête selon les six degrés de liberté de l'espace (trois en translation : x, y, z ; trois en rotation : roulis, tangage, lacet).

Chaque macule (figure 2.7) a une surface légèrement concave et est recouverte d'un épithélium de cellules sensorielles ciliées dont la base est maintenue par des cellules de soutien. La macule utriculaire humaine contient environ 33 000 cellules ciliées alors que la macule sacculaire en contient beaucoup moins approximativement 19 000 [Howard, 1986]. Chaque macule (utriculaire et sacculaire) est divisée en deux parties par une ligne de courbure, la striola. La striola sépare la direction de polarisation des cellules ciliées de chaque côté, ces cellules ont alors une polarisation opposée. Une inclinaison de la tête provoquera ainsi une augmentation de la décharge d'une partie de la macule et une diminution de la décharge afférente de l'autre portion de la macule [Fife, 2010; Goldberg et Fernández, 1984]. On peut ainsi voir l'organisation de la macule des organes otolithiques comme un système d'organisation « push-pull » incorporé dans la géométrie de la membrane otolithique (les capteurs additionnant en plus le signal venant de chaque côté de la tête) [Hain et al., 2000].

Une structure extra cellulaire fine et gélatineuse, la membrane otolithique (statoconiale ou otocoriale), recouvre chaque macule. Les cellules ciliées de chaque macule, comme celles des crêtes ampullaires, contiennent un paquet d'environ 70 cils fins appelés stéréocils ordonnés par ordre de grandeur jusqu'à ce que le plus long stéréocil soit adjacent au kinocil (le plus long et le plus large des cils qui est

légèrement excentré). La surface externe de cette membrane otolithique contient des cristaux de carbonate de calcium, appelés otolithes ou statoconies [Goldberg et Fernández, 1984; Howard, 1986]. Au repos la tête restant verticale, les organes otolithiques ont une décharge basale de repos, le cerveau interprète l'absence de variation de cette décharge de repos comme une immobilité. Lors d'une inclinaison de la tête, la membrane otolithique glisse le long de la macula alors que lorsque la tête est accélérée linéairement par rapport à l'espace inertielle, les cristaux par inertie (car plus denses que l'endolymphe) se déplacent moins vite et sont alors en retard [Young, 1984]. Une force de cisaillement (force dirigée perpendiculairement ou tangentiellment sur une surface) s'exerce alors entre les cristaux et la macule, la déformation provoquée (tangentielle) de la membrane gélatineuse par rapport à l'endolymphe sous-jacent va entraîner une flexion des cils et la génération d'un message nerveux [Goldberg et Fernández, 1984; Hain et al., 2000]. Contrairement à la cupule, la membrane otolithique retrouve sa position normale très rapidement après la cessation du stimulus grâce aux propriétés élastiques intrinsèques des cils [Benson, 1982; Howard, 1986]. A noter également que la membrane revient en position d'équilibre à vitesse constante, les organes otolithiques ne sont pas capables de distinguer une immobilité (position statique) d'un mouvement à vitesse constante.

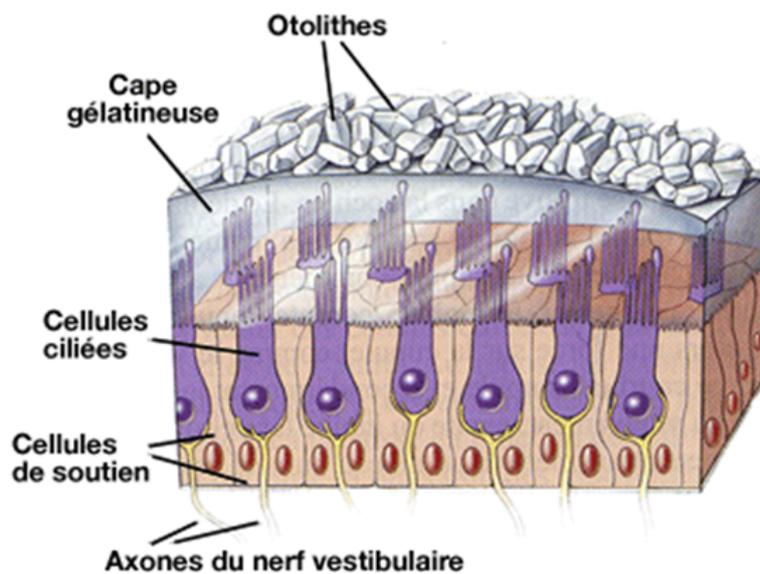


FIGURE 2.7 – Vue schématique en coupe d'une macule. D'après, Bear et al. [2006]

### 2.3.2.2 Spécificité des organes otolithiques

Les capteurs otolithiques ne sont pas des capteurs parfaits : il existe une ambiguïté fondamentale dans les signaux de ces organes liée à la façon dont ces organes sont structurés. En effet, d'après le principe d'équivalence d'Einstein qui stipule que l'accélération linéaire et gravitaire ont des effets équivalents (égaux) : « tout accéléromètre linéaire répond de manière équivalente à la gravité et à l'accélération linéaire » [Merfeld, 2009; Young, 1984]. Il existe ainsi un problème de distinction entre l'inclinaison céphalique et une accélération linéaire connu sous le nom de « *problème de la différenciation gravito-inertielle* ». Ce problème est à l'origine d'illusions de mouvement, où accélérations linéaires et inclinaisons peuvent être confondues. Typiquement, des personnes qui sont accélérées dans une chambre noire peuvent avoir la sensation d'être inclinées et cela même en l'absence de toute inclinaison. Cette illusion est fréquente pour des fréquences de mouvement inférieures à  $<0,05$  Hz et tend à diminuer ou s'annuler

pour des fréquences moyennes supérieures à  $> 0,2$  Hz [Merfeld, 2009]. Toutefois, ces illusions ont par le passé été responsables de nombreux accidents d'avion [Berthoz, 1997], en raison de l'illusion somato-gravique. Dans des conditions nuageuses, lorsque l'avion prend de la vitesse les organes otolithiques sont stimulés de la même manière qu'ils le seraient si l'avion s'était incliné en tangage vers l'arrière (mouvement d'inclinaison autour de l'axe  $y$ ). En raison de cette ambiguïté, le pilote peut être amené à ressentir cette inclinaison et vouloir en conséquence abaisser le nez de celui-ci. Cependant, si aucune manœuvre n'est réalisée, cette ambiguïté interprétée comme une inclinaison de la part du pilote peut conduire au crash de l'avion sur le sol. D'après Howard [1986], le fait que l'ambiguïté soit interprétée le plus souvent comme une inclinaison plutôt que comme une accélération linéaire suggère que la fonction principale des organes otolithiques serait la détection de l'inclinaison de la tête. Ces ambiguïtés peuvent être résolues par des informations sensorielles provenant d'autres capteurs comme les canaux semi-circulaires, les récepteurs visuels ou somesthésiques. Cette ambiguïté est généralement exploitée dans la dynamique des simulateurs de vol ou de conduite afin de leurrer notre système perceptif et d'augmenter l'illusion de perception du mouvement propre ; ce leurre est appelé le principe de tilt-coordination (voir chapitre 4, section 4.3.2.4).

De plus, comme les canaux semi-circulaires les organes otolithiques ne signalent une accélération linéaire qu'à partir d'un certain seuil. Les seuils de détection des accélérations linéaires sont très bas chez l'homme [Benson, 1982]. Le seuil moyen rapporté dans la littérature est de  $4,84 \text{ cm.s}^{-2}$  avec des valeurs dispersées de  $2,9$  à  $6,31 \text{ cm.s}^{-2}$  [Gianna et al., 1996], soit environ  $0,005 \text{ g}$ . Kingma [2005] indique des valeurs de seuils de  $8,5 \text{ cm.s}^{-2}$  pour un mouvement antéro-postérieur et de  $6,5 \text{ cm.s}^{-2}$  pour un mouvement latéral. D'autre part, Meiry [1965] souligne dans son étude une valeur de seuil de  $10 \text{ cm.s}^{-2}$  lorsque le sujet est en position allongée et une valeur de  $6 \text{ cm.s}^{-2}$  lorsqu'il est en position assise, suggérant ainsi que cette différence est due à une différence de l'angle de l'accélération imposée sur le plan utriculaire.

Concernant la sensibilité au changement de position, les organes otolithiques sont capables de détecter une inclinaison de l'ordre de  $1,5$  degrés [Young, 1984]. Ainsi, si la cinématique du mouvement est lente (infraliminaire) il faut alors atteindre une certaine amplitude pour que l'inclinaison soit perçue. D'autres études comme celle de Mann et Dauterive [1949] rapportent un arc d'incertitude (zone où l'individu ne détecte pas autour de la verticale) de  $4,4$  degrés ( $2,3$  degrés à gauche,  $2,1$  degrés à droite) en appliquant différentes méthodes. Plus récemment, Bringoux et al. [2002] ont montré que les individus ne percevaient un changement de leur orientation seulement lorsque l'inclinaison atteignait, en moyenne, une amplitude de  $5$  degrés lors d'une inclinaison latérale et de  $6$  degrés lors d'une inclinaison antéro-postérieure. Cependant, bien que ces seuils peuvent paraître élevés, ils sont bien plus importants lorsque les informations somatosensorielles sont réduites voir neutralisées, que ce soit lors d'une rotation de roulis [Nelson, 1968] ou de tangage [Bringoux et al., 2000, 2003]. La détection de l'inclinaison en roulis, avec une neutralisation complète des informations somesthésiques, était atteinte seulement à une amplitude de  $15,4$  degrés [Nelson, 1968]. Ces résultats mettent en évidence une faible fiabilité, dans certaines situations, des informations otolithiques et la place importante prise par les informations somatosensorielles pour la perception de l'orientation du corps [Bringoux et al., 2000, 2002, 2003; Janssen et al., 2011; Teasdale et al., 1999].

Enfin, alors que de nombreux facteurs d'influence ont été investigués sur la perception du mouvement comme la présence d'informations visuelles, peu de ces facteurs ont été étudiés pour la perception de l'inclinaison. On peut noter toutefois la tentative effectuée par Otakeno et al. [2002], qui ont investigué l'influence de différentes scènes visuelles sur le seuil de détection de l'inclinaison. A cette fin, Otakeno et ses collègues [2002] ont manipulé deux scènes visuelles différentes sur simulateur de désorientation

spatiale : (i) une scène de jour représentant une accélération longitudinale de l'avion à basse altitude survolant un terrain texturé (incluant des lignes de perspective et d'horizon) ; (ii) une scène similaire de nuit. Une condition contrôle (écran blanc) était également testée en comparaison. Les participants devaient indiquer dès que possible la direction de l'inclinaison en roulis. Les résultats de cette étude n'ont pas montré de différence significative de la condition visuelle ni du côté d'inclinaison sur le seuil de détection. Les participants ont en moyenne détecté une inclinaison à partir de 2 degrés. Otakeno et ses collègues [2002] expliquent l'absence d'effet de la condition visuelle par l'utilisation de scènes visuelles qui n'ont pas réussi à représenter de manière réaliste le monde réel, précisant que les scènes visuelles utilisées étaient basiques en termes de texture et que leur niveau de luminance ( $1,3 \text{ cd.m}^{-2}$  au maximum) était très inférieur à celui du monde réel.

### 2.3.3 Conclusion

Le système vestibulaire constitue une véritable centrale inertielle en fournissant des informations à la fois sur les accélérations (linéaires et angulaires) et l'inclinaison de la tête. En effet, les canaux semi-circulaires sont des détecteurs de vitesse angulaire pour des rotations de la tête comprise dans une gamme de fréquence naturelle. Ils fournissent ainsi des données sensorielles sur la vitesse de la tête permettant de garder les yeux stables dans l'espace et ainsi une vision claire pendant des mouvements de la tête. Ils vont à cette fin générer un mouvement lent de l'œil (appelé réflexe vestibulo-oculaire RVO) dans le sens du mouvement de l'endolymphe (soit en sens opposé au mouvement de la tête). Ce mouvement de l'œil est donc un mouvement compensateur avec une valeur proportionnelle au déplacement de la cupule, qui a pour fonction de maintenir le regard fixé sur un point de la scène visuelle. Par ailleurs, il est également important de noter que les canaux semi-circulaires ne sont stimulés qu'à partir d'un certain seuil de vitesse ou d'accélération. Ce seuil est influencé par de nombreux facteurs tels que la présence de sources visuelles, le profil du stimulus, le mode de présentation du stimulus (table tournante, simulateur, chaise, etc.), la restriction des mouvements de l'individu, ou encore la passivité de l'individu. Enfin, les canaux semi-circulaires peuvent donner des informations ambiguës lorsque celles provenant d'autres capteurs sensoriels sont absents. En effet, il apparaît que les canaux semi-circulaires ne peuvent pas distinguer lors d'une rotation à vitesse constante une décélération de la tête dans un sens, d'une accélération de la tête dans l'autre sens. Cette ambiguïté est habituellement levée par l'apport d'informations visuelles ou tactiles.

Les organes otolithiques constituent quant à eux des accéléromètres linéaires et répondent par conséquent aussi bien aux accélérations linéaires qu'aux changements d'orientation par rapport au vecteur gravitaire dans les 3 dimensions de l'espace ; ils agissent donc également comme des inclinomètres. Ils ont la capacité de détecter un changement d'orientation de la tête par rapport à la gravité à partir d'une inclinaison de 1,5 degrés. La stimulation de ces organes est à l'origine de la sensation consciente de la position de la tête par rapport à la verticale, de réflexes oculaires mais aussi posturaux comme pour protéger le corps d'une éventuelle chute en cas de changement brutal de position (notamment par la génération du réflexe vestibulo-spinal). Toutefois, il apparaît que ces capteurs sont également limités et ne peuvent pas différencier une accélération de la tête de l'accélération gravitaire ; pour lever cette ambiguïté des informations extra-vestibulaires sont nécessaires. De plus, bien que les organes otolithiques et les canaux semi-circulaires lèvent l'ambiguïté des informations provenant du système visuel concernant la nature des mouvements (si le mouvement d'objet est dû à un mouvement de soi ou de l'environnement), ces capteurs vestibulaires ne renseignent que sur l'état de mouvement de la tête et ne peuvent renseigner sur le mouvement et position du corps par rapport à la tête et l'environnement ou des re-

lations entre les différents segments corporels. D'autres informations sensorielles sont nécessaires pour fournir ces informations au cerveau et permettre une perception complète. Parmi ces informations, on peut citer les informations somesthésiques qui font l'objet de la section suivante.

## 2.4 La somesthésie

Bien que les principales informations non visuelles d'orientation chez l'homme soient à l'origine vestibulaires, les informations non vestibulaires ne doivent pas être ignorées. En effet, de nombreuses études ont mis en évidence l'importance de ces informations somesthésiques dans la perception de l'orientation spatiale [Bisdorff et al., 1996; Bronstein, 1999; Vaugoyeau et al., 2008; Yi et Park, 2009]. Dans la situation d'un mouvement d'inclinaison lent en roulis et tangage, plusieurs études ont montré que les informations provenant des récepteurs somesthésiques peuvent être plus pertinentes et précises que les informations provenant des organes otolithiques [Bringoux et al., 2002, 2003; Nelson, 1968]. Par ailleurs, ces informations sont toujours présentes, elles sont difficilement supprimables dans leur totalité exceptées lors des situations immergées avec un contrôle minutieux des flux, lors d'application d'un anesthésique local ou encore pour des personnes atteintes d'une lésion spinale. La somesthésie désigne les informations sensorielles issues du corps qui sont élaborées à partir des informations fournies par de nombreux récepteurs sensitifs du système somatosensoriel. Il s'agit d'un sens qui nous renseigne sur l'état de notre corps et sur notre environnement par l'intermédiaire de notre corps. D'après Sherrington [1906] le système somesthésique recouvre trois types de sensibilités : *sensibilité extéroceptive* (en relation avec le monde extérieur comme les sensibilités tactiles, thermiques, ou nociceptives), *proprioceptive* (renseigne sur les positions et mouvements du corps ; Purves et al., 2005; Young, 1984) et *intéroceptive* ou *viscérale* (présence de récepteurs graviceptifs, qui renseignent sur l'orientation du corps par rapport à la gravité et fournissent des informations de mouvement de soi ; Mittelstaedt, 1992, 1996; Jarchow et al., 2003).

## 2.5 Intégration multisensorielle par le cerveau : l'émergence d'une perception unifiée

Les informations redondantes provenant des capteurs sensoriels peuvent mener à de multiples interprétations perceptives, en conséquence le cerveau doit déterminer l'interprétation la plus probable au vu des informations sensorielles disponibles pour générer une perception cohérente et stable du monde environnant [Jacobs, 2002a]. De nombreuses recherches menées ces dernières années [Ernst et Banks, 2002; Ernst et Bühlhoff, 2004; Frissen et al., 2011; Hillis et al., 2004] suggèrent que les informations sensorielles sont intégrées par le cerveau en utilisant des inférences probabilistes (au travers de la loi de Bayes). Ainsi, au lieu de simplement sélectionner et traiter le meilleur signal sensoriel, il a été proposé une stratégie plus optimale combinant l'ensemble des signaux en assignant un poids (coefficient) proportionnellement à la fiabilité de chaque information qui correspond à l'inverse de leur variance [Angelaki et al., 2009; Ernst, 2006; MacNeilage et al., 2007, 2008]. La fusion des différentes informations sensorielles repose sur une moyenne pondérée où les coefficients appliqués à chaque information sont calculés à partir de leur fiabilité : les informations les plus fiables se voient attribuer un coefficient plus élevé. Selon cette théorie statistique d'intégration optimale, le traitement des informations sensorielles par le cerveau devrait produire une estimation multimodale plus fiable de la perception (avec une variance minimale), e.g., de l'orientation spatiale, qu'une estimation unimodale fournie par chacune des sources sensorielles séparément [Ernst et Banks, 2002; Frissen et al., 2011]. Ce travail d'optimisation aide ainsi

à réduire l'incertitude perceptive. Dès lors, sur figure 2.8, on peut observer que dans la situation où une source sensorielle devient non fiable (corrompue) l'estimation finale sera biaisée vers les sources sensorielles les plus fiables.

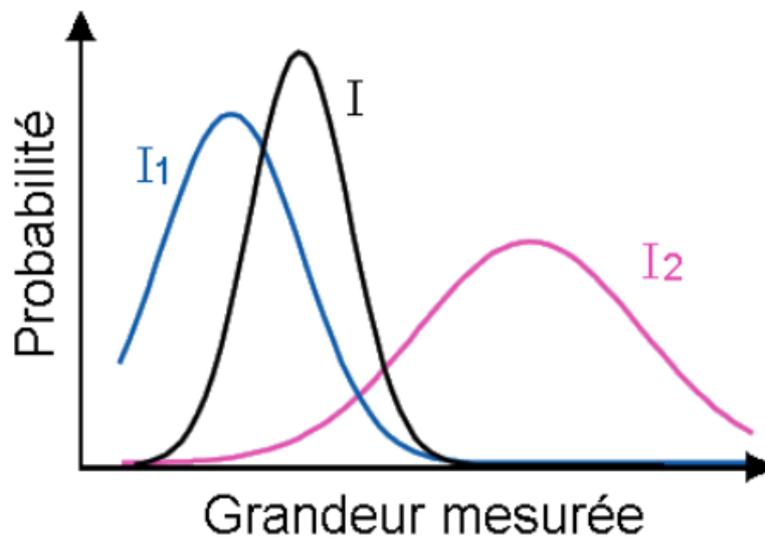


FIGURE 2.8 – Illustration schématique de la fusion de deux sources sensorielles I1 et I2 en une estimation multimodale I, selon le modèle statistique d'intégration optimale (modèle Bayésien). Extrait de Caro [2008]

Ce modèle Bayésien a été appliqué à des tâches perceptives très variées, incluant la perception de la profondeur [Adams et Mamassian, 2004; Hillis et al., 2004], la localisation spatiale (e.g., effet du ventriloque ou '*ventriloquist effect*'; Alais et Burr, 2004), la perception de la grandeur ou '*size perception*' [Ernst et Banks, 2002; Ernst, 2007], la perception du mouvement de soi [Butler et al., 2010; Fetsch et al., 2009], la perception de l'orientation de soi et accélération de soi (e.g., désambiguïsation de la force gravito-inertielle; MacNeilage et al., 2007, 2008), la perception de la verticale subjective [De Vrijer et al., 2008, 2009; Vingerhoets et al., 2008], ou encore la perception du 'haut' (en anglais, *perceptual upright*; Dyde et al., 2009). Aussi, cette approche est considérée comme un dispositif puissant pour étudier les mécanismes sous-tendant la perception humaine [Jacobs, 2002a]. Plusieurs travaux montrent que les individus intègrent les informations de façon statistiquement optimale pour des informations appartenant à la même modalité sensorielle, e.g., entre les sources d'informations visuelles relatives à la perception de la profondeur [Adams et Mamassian, 2004; Hillis et al., 2004; Jacobs, 2002a,b], et appartenant à différentes modalités sensorielles telles qu'entre les informations haptiques et visuelles pour la perception de la grandeur [Ernst et Banks, 2002; Ernst, 2007] ou les informations auditives et visuelles pour la localisation spatiale [Alais et Burr, 2004]. Il a également été mis en évidence que les coefficients de pondération assignés aux informations relatives au mouvement propre pouvaient être ajustés 'en temps réel' durant la réalisation d'une tâche donnée [Fetsch et al., 2009].

Récemment, Isableu et al. [2010] ont suggéré que cette théorie statistique d'intégration optimale, qui produit un percept multisensoriel fiable de l'orientation spatiale, peut dépendre de la sélection d'un cadre de référence approprié (visuel, vestibulaire ou égocentré) (voir précédemment, section 2.1 pour plus de détails sur les cadres de référence). En effet, en situation normale les informations sont redondantes et un individu utilisera préférentiellement un seul cadre de référence pour orienter son corps dans l'espace. Par conséquent, le poids assigné aux informations sensorielles peut varier selon le cadre de référence préférentiel d'un individu (lié aux modalités sensorielles visuelle, vestibulaire ou proprioceptive),

référé communément comme 'style perceptif'. De plus, il apparaît que les individus peuvent changer leur stratégie de combinaison des informations sensorielles en assignant un coefficient plus élevé aux informations fiables et un plus faible coefficient à celles non fiables, la fiabilité des informations visuelles et non-visuelles dépendant alors de leur style perceptif [Isableu et al., 2010]. Ce phénomène peut potentiellement expliquer la manifestation de différences interindividuelles pour une même situation physique ou perceptive (comme lors du test du cadre et de la baguette ; Oltman, 1968; Witkin et Asch, 1948).

Enfin, toutes les informations provenant de différentes modalités sensorielles ne sont pas redondantes. Les informations provenant de ces diverses modalités sont dans de nombreuses situations complémentaires. Pour combiner ces informations complémentaires en un percept cohérent et stable, différents modèles peuvent être appliqués, certains d'entre eux sont par ailleurs en accord avec la fusion des informations sensorielles (voir Ernst et Bühlhoff, 2004, pour une discussion approfondie).

## **2.6 Conséquences physiologiques lors de l'inclinaison en roulis : spécificité de la conduite motocycliste sur route et sur simulateur**

Nous venons de décrire les mécanismes physiologiques des différents systèmes sensoriels dans leur généralité. Dans cette section seront abordés les mécanismes sensoriels impliqués seulement lors de l'inclinaison en roulis, en précisant le cas particulier de l'inclinaison en roulis expérimentée sur moto puis sur simulateur. Rappelons tout d'abord que les capteurs vestibulaires sont responsables de la détection des déplacements linéaires et angulaires de la tête mais uniquement lorsque ces déplacements dépassent un certain seuil. Dans les sections précédentes, il est apparu que ce seuil dépendait de plusieurs facteurs (e.g., fréquence, type, durée du mouvement) et était propre à chaque capteur. En effet, les organes otolithiques signalent une accélération lorsque celle-ci dépasse  $5 \text{ cm.s}^{-2}$ . Les canaux semi-circulaires sont quant à eux capables de détecter une accélération à partir de  $0,5 \text{ deg.s}^{-2}$  en moyenne pour des mouvements de roulis et tangage et à partir de  $0,1-0,2 \text{ deg.s}^{-2}$  pour un mouvement de lacet (les canaux étant plus sensibles à ce type de mouvement). Le système visuel est lui capable de détecter un mouvement plus rapidement (temps de réaction pour la perception d'un mouvement de la tête : 438 ms ; temps de réaction à un stimulus lumineux : 220 ms ; Barnett-Cowan et Harris, 2009; VanRullen et Thorpe, 2001). Cependant, le système visuel ne peut caractériser à lui seul l'origine du mouvement ; cette ambiguïté est résolue habituellement par l'apport d'autres modalités sensorielles comme les capteurs vestibulaires et proprioceptifs.

Lors d'une inclinaison corporelle en roulis, les deux capteurs des organes otolithiques (sacculé et utricule) sont stimulés car le vecteur d'accélération gravitaire change de position sur la surface maculaire des organes otolithiques, mais ces capteurs sont activés dans des proportions différentes. En effet, en raison de leur disposition anatomique, lorsque la tête est maintenue droite le sacculé est pleinement stimulé par l'accélération gravitaire tandis que l'utricule l'est très peu [Goldberg et Fernández, 1984]. En revanche, lors d'une inclinaison latérale (roulis) de la tête l'utricule devient alors de plus en plus activé par rapport au sacculé [Hain et al., 2000]. L'inclinaison latérale provoque ainsi une stimulation permanente des cellules des organes otolithiques alors que les canaux semi-circulaires cessent eux d'être stimulés quelques secondes après l'arrêt de l'inclinaison (accélération angulaire nulle). Il est bien entendu possible que seuls les organes otolithiques soient stimulés lorsque l'inclinaison est produite à partir de profil d'accé-

lération infraliminaire (en deçà du seuil d'excitation canaliculaire) mais cette situation n'est produite que lors d'expérimentations en laboratoire. Le système vestibulaire ne renseigne que sur les mouvements relatifs de la tête : il ne peut renseigner sur l'état des segments corporels par rapport à l'environnement. Les informations sensorielles somesthésiques complètent alors les informations obtenues par le système vestibulaire pour obtenir une perception complète et unifiée de l'orientation du corps. Une inclinaison latérale du corps va ainsi modifier, en fonction de la contrainte posturale, les stimulations tactiles ainsi que la répartition et l'intensité des pressions sur la peau ou encore les stimulations qui s'exercent au niveau des récepteurs graviceptifs abdominaux. On peut souligner également qu'une inclinaison corporelle en roulis produit une rotation en roulis de l'œil dans le sens inverse du mouvement, appelé la contre-cyclotorsion oculaire. Ce réflexe permet de compenser l'inclinaison céphalique, son amplitude correspond généralement à 10 % de l'amplitude de l'inclinaison corporelle et atteint son maximum lors d'une inclinaison corporelle de 60 degrés [Bischof, 1974].

En comparaison, les mécanismes physiologiques impliqués lors d'une inclinaison du couple conducteur-moto semblent différer de celles d'une inclinaison corporelle traditionnelle décrite ci-dessus. Toutefois, aucune étude ne s'est intéressée aux modes de contrôle d'un deux-roues en situation réelle, et les comportements déclarés des conducteurs diffèrent entre eux. Par conséquent, les mécanismes impliqués lors d'une inclinaison en roulis sur route sont mal connus en raison du flou existant sur le comportement (positionnements et actions) des motocyclistes par rapport à leur moto. L'approche la plus courante soutenue par les constructeurs et ingénieurs est donnée ci-dessous.

En environnement réel, quand le conducteur prend un virage, il est exposé à une force gravito-inertielle (FGI), qui est la résultante des accélérations gravitaire et centrifuge. Il est, par conséquent, supposé que le conducteur aligne son corps et la moto sur la FGI afin de maintenir son équilibre [Cossalter et al., 2004]. Il est par ailleurs généralement admis que les motocyclistes essaient de maintenir (redresser) leur tête droite par rapport à l'horizon [Cossalter et al., 2004], probablement pour conserver un alignement sur la verticale objective. Ainsi, seul le corps suivrait l'inclinaison de la moto. Par conséquent, c'est uniquement durant les moments de transition (entrée et sortie de virage) que les canaux semi-circulaires envoient des influx nerveux au cerveau pour signaler un déplacement inertiel. Pendant l'état stable du virage (milieu de virage), les organes otolithiques ne peuvent pas faire la différence entre une accélération linéaire et gravitaire envoyant ainsi un signal ambigu. Les canaux semi-circulaires ne sont plus quant à eux stimulés car la tête est restée droite par rapport à l'horizon. Les canaux semi-circulaires ne sont alors plus exposés à une accélération angulaire. De plus, due à la FGI, les informations proprioceptives et extéroceptives ne signalent pas de modifications de stimulations tactiles, de la distribution et de l'intensité des pressions sur la peau, les motocyclistes étant en équilibre sur la moto. Seuls les récepteurs situés au niveau de la nuque fournissent des informations de mouvement de la tête qui se redresse par rapport au reste du corps. Néanmoins, lors d'entretiens verbaux informels avec des motocyclistes, certains déclarent incliner la tête dans le sens du virage ou encore « sortir » le corps de l'axe de la moto, soit dans le sens du virage pour limiter l'inclinaison de leur véhicule, soit vers l'extérieur du virage dans le but de garder le buste et la tête droit. Notons que dans la situation où les motocyclistes se déhancheraient par rapport à la moto, les récepteurs somesthésiques seraient alors stimulés par les changements de distribution et intensités des pressions sur la peau, ainsi que par des modifications de stimulations des récepteurs graviceptifs et aussi tactiles.

En simulation de conduite moto, les conséquences physiologiques lors d'une prise de virage vont différer à la fois d'une inclinaison corporelle classique, comme celle reproduite lors d'études psychophysiques

dont le centre de rotation est situé au niveau de la tête, mais aussi de celle d'une inclinaison ressentie sur une moto réelle. En effet, hormis les simulateurs reposant sur une plate-forme de type Gough-Stewart (voir p. 46), qui permet de garder un centre de rotation près de la tête du conducteur [Cossalter et al., 2004], les simulateurs comme le simulateur IFSTTAR, objet d'étude de cette thèse, impliquent une localisation du centre de rotation plus basse que le niveau de la tête. Sur le simulateur IFSTTAR, le centre de rotation se situe, au plus haut, au niveau de l'assise du conducteur. De plus, en raison de l'absence de l'accélération centrifuge qui ne peut être produite sur simulateur, le couple conducteur/simulateur n'est plus soumis à la FGI mais uniquement à l'accélération de la gravité. Par conséquent, à l'entrée de virage, les canaux semi-circulaires sont stimulés par l'accélération angulaire produite et les organes otolithiques vont détecter une accélération tangentielle (linéaire) en raison du décalage du centre de rotation par rapport à la tête [Cossalter et al., 2004; Heerspink et al., 2005]. Ces derniers détectent aussi constamment (à l'entrée, état stable, et sortie de virage) l'accélération gravitaire. En raison de la présence unique de la force de gravité, les récepteurs somesthésiques vont signaler l'asymétrie des pressions et contractions exercées que ce soit pendant les moments de transition - entrée et sortie de virage - ou pendant l'état stable en milieu de virage. Cette importante force latérale (gravitaire) est susceptible de se manifester par une sensation de forte instabilité voire de chute sur simulateur de deux-roues motorisé.

Les concepteurs de simulateurs cherchent généralement à reproduire sur simulateur les accélérations ressenties par le conducteur sur sa moto. Pour cette raison, ils utilisent des filtres washout qui ne vont restituer que les hautes fréquences (le système vestibulaire étant sensible aux hautes fréquences) de l'accélération [Cossalter et al., 2004]. Le principe est alors de ne restituer que les moments de transition de la prise de virage (entrée et sortie) par une « secousse » de la structure (restitution d'accélération), avant de faire revenir le simulateur en position neutre en deçà des seuils de détection vestibulaire, puisqu'en situation réelle aucune accélération n'est censée être perçue pendant l'état stable de la prise de virage. Dès lors, l'angle d'inclinaison normalement pris par la moto est restitué uniquement par une inclinaison de l'horizon de la scène visuelle affichée au moyen d'écrans plats, sphériques ou casques de réalité virtuelle.

Toutefois, ces filtres sont complexes à mettre en œuvre et difficilement applicables puisqu'ils nécessitent un retour de la plate-forme mobile sans que les conducteurs ne le perçoivent [Ferrazzin et al., 2001]. La vitesse de retour est fonction des seuils de détection nécessairement mesurés sur le simulateur. De plus, le bruit et vibrations inhérents aux actionneurs compliquent également l'implémentation d'un tel filtre. D'autre part, il n'est pas certain que restituer, uniquement par la scène visuelle, l'angle d'inclinaison de la moto correspondant à la phase de stabilité du virage produise une sensation d'inclinaison 'crédible' ou 'réaliste' chez le conducteur similaire à celle qu'il éprouve sur sa moto. Enfin, le recours à ce type de stimulation sensorielle et à de tels filtres se confronte d'une part, à la haute dynamique de la conduite en moto (les changements d'inclinaison sont fréquents, avec des accélérations importantes), et d'autre part, pose la question de la nature de la stimulation à fournir pour la phase de retour à l'équilibre de la moto lors de la sortie de virage (inclinaison du simulateur à droite pour simuler une sortie de virage à gauche ?).

Enfin, on ne peut affirmer avec certitude que les conducteurs ne sont exposés à aucune accélération pendant l'état stable du virage. Selon l'inclinaison du conducteur par rapport au châssis de la moto (e.g., conducteur s'inclinant moins que la moto), le conducteur peut potentiellement être exposé à des accélérations pendant cette phase. Or, rappelons que le comportement du conducteur et ses actions par rapport à la moto restent aujourd'hui encore peu connus et nécessitent d'être éclaircis.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, le rôle des informations captées par les différentes modalités sensorielles et impliquées dans la perception du mouvement propre a été démontré. Bien que le système visuel constitue une source importante d'informations sur le mouvement propre durant l'activité de conduite, il apparaît que d'autres modalités sensorielles sont également sollicitées dans la perception du mouvement propre, notamment afin de lever les ambiguïtés non-résolues par la seule modalité visuelle. En effet, les informations vestibulaires sont nécessaires afin de déterminer l'origine du mouvement des objets (due à un mouvement propre ou à l'environnement). Ces récepteurs vestibulaires sont des capteurs inertiels permettant une détection précise d'un mouvement de la tête. Cependant, ces récepteurs comportent aussi certaines limites inhérentes à leurs caractéristiques biomécaniques, comme le problème de différenciation gravito-inertielle des organes otolithiques (et récepteurs somesthésiques) ou encore le fait qu'aucun influx nerveux ne soit produit si le mouvement est effectué à vitesse constante.

D'autre part, les conséquences physiologiques d'une inclinaison corporelle 'ordinaire', d'une inclinaison en conduite moto et d'une inclinaison sur simulateur moto ont été décrites. Il apparaît que d'importantes différences semblent exister au niveau de la stimulation des différents capteurs sensoriels entre ces trois situations et notamment entre l'inclinaison sur véhicule réel et celle sur simulateur moto, en raison de l'absence des forces centrifuge et centripète, ainsi que de la localisation du centre de rotation du roulis (pour l'exemple du simulateur IFSTTAR). En effet, l'architecture du simulateur IFSTTAR (présentée dans le chapitre suivant) implique une localisation du centre de rotation plus basse que le niveau de la tête, par conséquent une accélération tangentielle sera produite lors de l'inclinaison du simulateur et celle-ci sera détectée par les organes otolithiques. De plus, en raison de l'absence de l'accélération centrifuge qui ne peut être produite sur simulateur, le couple conducteur/simulateur n'est plus soumis à la force gravito-inertielle mais uniquement à l'accélération gravitaire (que ce soit pendant les moments de transition - entrée et sortie de virage - ou pendant la phase stable du virage), détectée à la fois par le système vestibulaire et par les récepteurs proprioceptifs en raison des modifications de pression et des stimulations tactiles ou graviceptives. En conséquence, il est possible que le conducteur perçoive un mouvement de chute, établi à partir de l'intégration des informations sensorielles disponibles et du (ou des) cadre(s) de référence choisi(s).



## Chapitre 3

# Architecture des simulateurs de conduite

### 3.1 Architecture structurelle usuelle d'un simulateur de conduite

Les simulateurs de conduite n'étant soumis à aucune norme de construction, chaque simulateur constitue un prototype en soi. Néanmoins, un certain nombre de caractéristiques sont communes à l'ensemble des simulateurs, que ces derniers soient statiques ou dynamiques (figure 3.1). On distingue :

- *Le châssis du véhicule ou cockpit* : en simulation de vol ou de voiture, il s'agit essentiellement d'un intérieur semblable à celui d'un vrai cockpit ou d'un vrai véhicule incluant l'ensemble des commandes (pédales de freins, volant, levier de vitesse, etc.). En simulation de conduite d'un véhicule ouvert comme le deux-roues motorisé, le châssis d'une vraie moto ou inspiré d'une moto, incluant également l'ensemble des organes de commande (sélecteur de vitesse, accélérateur, etc.), est couramment utilisé.
- *Le système de restitution visuelle* : il permet d'afficher les images projetées par un ou des vidéoprojecteur(s) sur un ou plusieurs écran(s). Le champ de vision est ainsi variable d'un simulateur à un autre. Toutefois, le champ de vision pouvant affecter le phénomène devection (*i.e.*, perception de mouvement propre) mais aussi l'immersion du conducteur (voir p. 62), il est suggéré dans la littérature un champ de vision minimal de 120 degrés pour la situation de conduite [Kemeny et Panerai, 2003; Jamson, 2000]. De plus, différentes interfaces visuelles peuvent être utilisées comme systèmes de restitution visuelle. Elles peuvent être soit fixes (*e.g.*, écrans à facettes, cylindriques, écrans ou télévision LCD) ou portables (*e.g.*, casque de réalité virtuelle). Ces systèmes sont en général similaires à ceux utilisés dans le domaine de la réalité virtuelle (pour revue, volume 2 du Traité de la Réalité Virtuelle; Fuchs et al., 2006).
- *Le système de restitution inertielle* : présent sur les simulateurs dynamiques, il permet de donner à l'habitacle du véhicule son mouvement dans l'espace. L'architecture la plus utilisée est la plateforme parallèle de type Gough-Stewart. On peut noter que toute architecture de restitution inertielle utilise des actionneurs de type vérins pour mettre en mouvement le simulateur. Ces vérins peuvent être hydrauliques (*e.g.*, le simulateur MORIS de PERCRO), pneumatiques (*e.g.*, le simulateur 'MotorcycleSim' de l'Université de Nottingham) ou électriques (*e.g.*, le simulateur IFSTTAR). Les vérins hydrauliques et pneumatiques peuvent développer une plus grande puissance et atteindre des vitesses linéaires plus élevées que les vérins électriques mais nécessitent une centrale

- (hydraulique/pneumatique) pour mettre sous pression l'huile ou l'air arrivant aux vérins (pouvant générer une nuisance sonore). Les vérins électriques, fonctionnant par un système vis/écrou piloté via la rotation d'un moteur électrique, présentent l'avantage d'être faciles à mettre en œuvre et d'entretien, et produisent des performances plus précises. Les vérins électriques présentent également l'avantage d'être moins coûteux et d'offrir un meilleur rapport qualité/prix [Nehaoua, 2008].
- *Le système de restitution somesthésique ou haptique* : il permet de reproduire l'état de la route via des dispositifs de vibration au niveau du volant ou du siège. Parmi ces systèmes, on peut noter les interfaces à retour d'effort (e.g., sur le volant ou guidon du véhicule) qui fournissent au conducteur des sensations d'effort fourni et permettent ainsi une interaction avec l'environnement ainsi qu'une perception simultanée de ce dernier. Ces systèmes de restitution haptique semblent avoir un effet positif dans les situations de prise de virage ou de freinage, en particulier lorsqu'ils sont installés sur un simulateur statique [de Winter et al., 2007].
  - *Le système de restitution sonore* : il permet de restituer l'environnement sonore présent lors de la conduite comme le bruit du moteur, bruit des autres véhicules, du vent, klaxons, glissades, collisions, etc. contribuant ainsi à une meilleure perception du mouvement propre [Kapralos et al., 2004]. Certains systèmes utilisent un système de restitution sonore spatialisé permettant soit de localiser précisément la source ou de réaliser une restitution plus diffuse. Les informations sonores délivrées par ces systèmes de restitution sont importantes car elles ont la capacité d'induire à elle seule une illusion de mouvement de soi [Riecke et al., 2005b; Valjämäe, 2005; Våljamäe, 2009] et également un sentiment de présence (voir section 4.1.4) [Larsson et al., 2005].

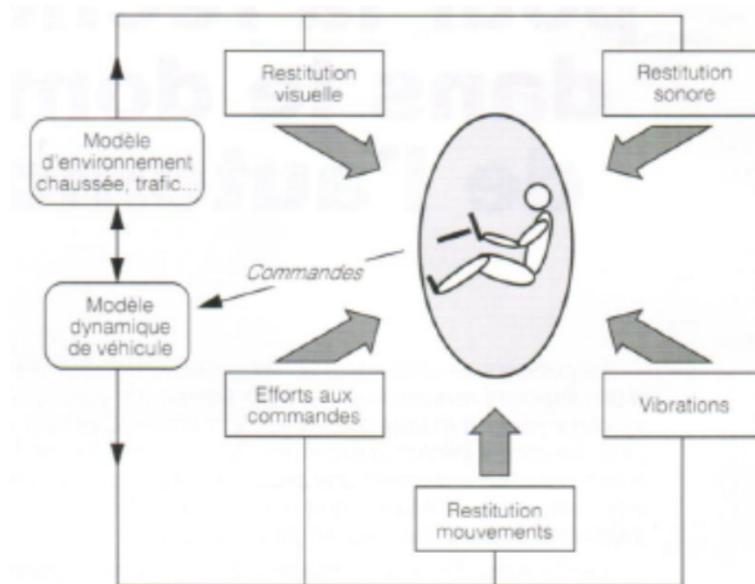


FIGURE 3.1 – Décomposition fonctionnelle d'un simulateur, Extrait de Gauriat et Lechner [1991]

### 3.2 Architecture logicielle usuelle d'un simulateur de conduite

Outre l'architecture générale présentée précédemment, tout simulateur dispose également d'une architecture logicielle employée pour simuler la conduite du véhicule dit virtuel. Certains logiciels de simulation sont complets (e.g., SCANeR©) et possèdent différents modules permettant de gérer les différents

aspects de la simulation de conduite, du calcul des images visuelles à afficher et la génération d'un trafic autonome au pilotage des différents éléments de l'architecture mécanique du simulateur via la stratégie de commande choisie. De plus, certains logiciels comme SCANeR© utilisent un système de communication partagée. Le logiciel de simulation est alors 'parallélisable' ('clusterisable') : les modules peuvent être lancés sur des ordinateurs distincts et communiquer entre eux via le réseau. Ce système permet de profiter de ressources maximales. Cependant, comme tout logiciel commercial, ceux-ci ne sont pas transparents et l'utilisateur ne peut pas modifier les différents modules proposés comme il le souhaiterait. De plus, ces logiciels présentent un coût important à l'achat et en termes de maintenance. C'est pourquoi le simulateur de conduite IFSTTAR, objet de recherche de cette thèse, n'utilise pas ce type de logiciel de simulation mais a recours à deux logiciels de simulation distincts mais communiquant en réseau via UDP :

- (i) Le logiciel ARCHISIM [Espié, 1999] qui gère les différents aspects visuels de la simulation comme le calcul des images visuelles à afficher, la génération du trafic, la mise en œuvre du scénario, etc.
- (ii) Le logiciel MATLAB qui, avec le logiciel SIMULINK, permet de définir la stratégie de commande (incluant ou non le modèle dynamique du véhicule simulé). Cette stratégie de commande gère également l'acquisition des données renvoyées par le cockpit ainsi que le pilotage des actionneurs. Pour la simulation, la stratégie de commande est exécutée depuis un PC dédié, après y avoir été compilée et chargée grâce au module XPC Target de MALAB.

### **3.3 Les simulateurs de deux-roues motorisé : leurs caractéristiques architecturales et dynamiques**

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 réel 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>1</sup> et de l'effet gyroscopique qui permet à la moto de rester en équilibre quand elle roule. L'effet gyroscopique, dû 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. La condition d'équilibre est atteinte lorsque l'angle d'inclinaison est proportionnel à

---

1. 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.

la vitesse longitudinale et au rayon de courbure du virage. Toutefois, cette manœuvre n'est pas aisée car avec une prise d'angle insuffisante le véhicule sortira alors de sa trajectoire et avec une prise d'angle trop importante une perte d'adhérence (due à la diminution de la surface de contact entre pneu/sol) peut engendrer une glissade vers l'extérieur du virage. En sortie de virage, c'est cette même force gyroscopique qui permet au deux-roues motorisé de se redresser. Selon Belmonte [2001] et Cossalter et al. [1999], 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.

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 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 plate-forme mobile du simulateur différentes étapes de calcul sont nécessaires (figure 3.2). 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**, connue également sous le nom de « filtre washout » ou d'« algorithme de restitution inertielle », 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 plate-forme mobile par les actionneurs**.

Principalement en raison d'un besoin de connaissances important pour améliorer la sécurité des usagers de deux-roues motorisé, équipes de recherches et constructeurs se sont tournés ces dix dernières années vers la construction de simulateurs de deux-roues motorisé dynamiques, dotés de systèmes de restitution du mouvement plus ou moins complexes. Précédemment, on a pu se rendre compte que tout simulateur présente des caractéristiques communes en demeurant toutefois un prototype unique en soi. 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.

La littérature portant sur les simulateurs de deux-roues motorisé est peu abondante en comparaison de celle des simulateurs automobiles. Généralement, différentes techniques de classification des simulateurs existent selon le niveau d'investissement et de technologie de ces derniers, la plus connue étant la classification par coût [Jamson et Mouta, 2004; Kaptein et al., 1996]. On parle alors communément de simulateur de bas, moyen et haut niveau. Toutefois, une confusion entre le niveau attribué par classification et le degré de validité du simulateur peut être présente à la lecture. De plus, la majorité des

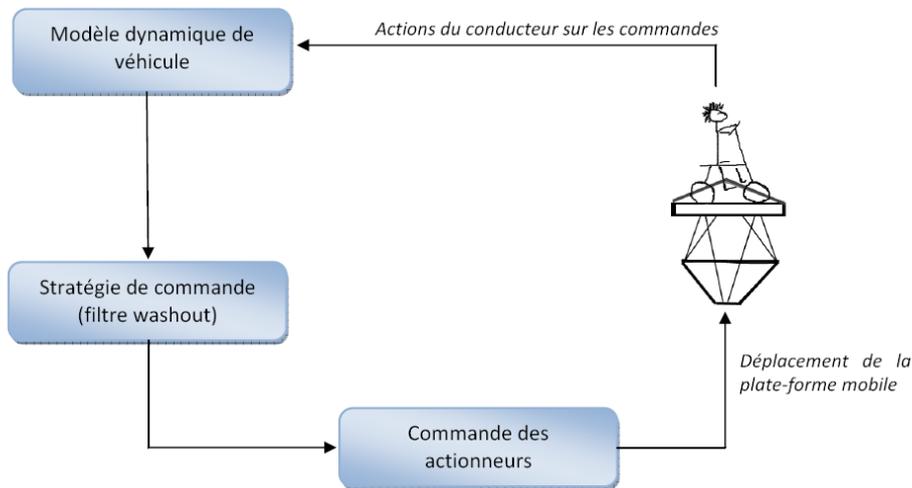


FIGURE 3.2 – Schéma simplifié de la chaîne de simulation pour un système de restitution de mouvement (inspiré de Barbagli et al., 2001)

simulateurs de deux-roues motorisé modernes se classeraient dans la catégorie ‘moyen niveau’, et aucun à notre connaissance ne répondrait aux critères définissant un simulateur dit de ‘haut-niveau’. La section suivante dresse ainsi une présentation des principaux simulateurs de conduite de deux-roues motorisé au moyen d’une classification chronologique. Un certain nombre de brevets de conception de simulateurs moto ont été déposés mais aucune information ne permet de confirmer le développement effectif de ces simulateurs [Nehaoua et al., 2011]. Seuls les simulateurs de deux-roues motorisé modernes seront par conséquent abordés (voir Bougard, 2009 pour une revue des brevets déposés). Pour chacun d’entre eux, l’origine du développement du simulateur, le nombre et les caractéristiques de chaque degré de liberté produit par le simulateur seront détaillés. Puis, il sera décrit dans la mesure du possible l’architecture mise en œuvre (caractéristiques des vérins, localisation des centres de rotation des mouvements, présence de capteurs d’effort, etc.) pour la restitution de mouvement ainsi que les modèles dynamiques de véhicule et/ou les stratégies de commande implémentées. Enfin, les caractéristiques des restitutions visuelle et sonore seront précisées. L’ensemble des principales caractéristiques de chaque simulateur est également présenté de manière synthétique dans les tableaux comparatifs 3.1 et 3.2.

### 3.3.1 Les simulateurs Honda

Le premier prototype (figure 3.3) de simulateur Honda fut développé en 1988. Pour cette entreprise, l’objectif était double [Chiyoda et al., 2002; Miyamaru et al., 2002] : (i) étudier la manœuvrabilité sur un simulateur de conduite, et (ii) étudier la faisabilité d’un cursus de formation axé sur la gestion des situations à risque. Ce premier prototype présente une plate-forme mobile à balancier (mouvement similaire à celui d’une chaise à bascule) à 5 degrés de liberté (ddl) : tangage, lacet, roulis, latéral et rotation du guidon. Le comportement dynamique de la moto virtuelle est généré via l’utilisation d’un modèle dynamique linéaire à 4 ddl (le mouvement latéral, le lacet, le roulis et la direction) développé initialement par Sharp [1971] [Miyamaru et al., 2002].

Cependant, à la suite de tests impliquant des motocyclistes expérimentés (publication de ces tests non précisée), les usagers éprouvaient tous d’énormes difficultés à contrôler le simulateur durant les prises de virage, ne parvenant pas à ressentir la position de la moto en mouvement dans l’espace. Ces difficultés furent attribuées à l’absence de force centrifuge, l’accélération latérale ressentie étant différente

TABLE 3.1 – Caractéristiques des principaux simulateurs moto

Simulateurs	But	Habitacle réel	Nombre de ddl	Tangage (°)	Lacet (°)	Roulis (°)	Guidon (°)	Déplacements latéraux (m)	Déplacements verticaux (m)	Déplacements longitudinaux (m)
Honda P1	Formation	Non	5	Oui-ND	Oui-ND	Oui-ND	Oui-ND	Oui-ND	-	-
Honda P2	Formation	Non	3	10	-	15	30	-	-	-
Université de Tokyo	Sensation de conduite d'une moto réelle	ND	6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Université Nihon	Étude des comportements conducteurs	ND	3	15	-	20	10	-	-	-
MORIS	Ingénierie	Oui	7	Oui-ND	Oui-ND	Oui-ND	Oui-ND	Oui-ND	Oui-ND	Oui-ND
DIGEM	Interaction homme-véhicule	Non	5	10	20	20	20	0,3	-	-
Honda Riding Trainer	Formation	Non	1	-	-	-	Oui-ND	-	-	-
IFSTTAR	Formation + Étude des comportements conducteurs	Oui	4	10	10	12,5	40	-	-	-
MotorcyclesSim	Ergonomie d'une moto + Étude des comportements conducteurs	Oui	2	-	-	25	Oui-ND	-	-	-

Note : ND = donnée non disponible et le sigle '-' signifie que la caractéristique en question n'est pas présente sur le simulateur

TABLE 3.2 – Caractéristiques des principaux simulateurs moto - suite.

Simulateurs	Type de vérins	Localisation du centre de rotation de roulis	Capteurs d'effort	Modèle de véhicule	Contre-braquage	Caractéristiques de la restitution visuelle	Champ visuel latéral	Validation	Son
Honda P1	ND	ND	ND	Dynamique d'une moto réelle - Sharp [1971]	Non	1 écran attaché à la nacelle du simulateur	254 cm	ND	ND
Honda P2	ND	25 cm au dessus du niveau de la route, à l'avant (> 40 cm) de l'assise	ND	Fonctionnel	Non	1 écran plat	132 cm	Yamasaki et al. [1998]	Son Stéréo
Université de Tokyo	Hydrauliques	Tête	ND	Dynamique d'une moto réelle - Katayama [1996]	ND	Casque de réalité virtuelle (HMD)	ND	ND	Source sonore variant avec la position de la tête
Université Nihon	ND	ND	ND	Dynamique d'une moto réelle - modèle adapté de Sharp [1971]	ND	1 écran plat	150°	Kageyama et Tagami [2002]	Son spatialisé
MORIS	Hydrauliques	Tête	ND	Dynamique d'une moto réelle - Ferrazzin et Barbagli [2000]	ND	1 écran plat fixé au mur face au simulateur	ND	ND	Son spatialisé binaural restitué via un casque
DIGEM	-	Tête	Oui	Dynamique d'une moto réelle - Cossalter et al. [2004, 2010]	Oui	3 écrans plats	240°	Cossalter et al. [2010]	Son spatialisé
Honda Riding Trainer	-	-	Non	ND	Non	1 écran d'ordinateur	ND	ND	ND
IFSTTAR	Electriques	Axe de roulis passant à 23 cm sous l'assise du conducteur	Oui	Fonctionnel + Dynamique d'une moto réelle + basique (braquage)	Oui	2 possibilités : 1 écran plat ou mur de 3 écrans plats (jusqu'à 6 écrans possibles)	72° ou 180° (jusqu'à 360° si 6 écrans)	Présente thèse	Son spatialisé restitué via des enceintes
MotorcycleSim	Pneumatiques	Au point de contact pneu/chaussee	ND	Dynamique d'une moto réelle - Meijaard et al. [2007]	Oui, mais mal évalué par les utilisateurs	1 écran plat	~ 2,5 m <sup>2</sup>	Stedmon et al. [2009]	Son spatialisé restitué via des enceintes

Note : ND = donnée non disponible et le sigle '-' signifie que la caractéristique en question n'est pas présente sur le simulateur

de celle rencontrée en situation de conduite réelle. De plus, les conducteurs présentaient une tendance à conduire le simulateur comme une voiture, c'est-à-dire à tourner le guidon en direction du virage, alors qu'en conduite réelle, il est globalement reconnu que les conducteurs réalisent une manœuvre de contre-braquage. Le concept de contre-braquage, qui constitue un des enjeux majeurs des modèles de véhicule deux-roues, reste d'ailleurs très complexe à reproduire et dans de nombreux cas, le simulateur peut devenir incontrôlable [Chiyoda et al., 2002; Miyamaru et al., 2002].

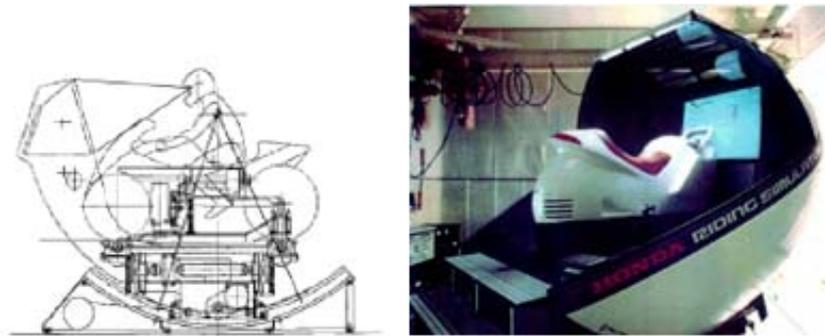


FIGURE 3.3 – Prototype n°1 du simulateur Honda (source : <http://world.honda.com/motorcycle-technology/sim/p3.html>)

A partir de ces différents constats, un deuxième prototype fut développé dans le but de concevoir un dispositif plus compact. La question de la contrôlabilité du simulateur fut cependant considérée comme étant de première importance, reléguant ainsi la reproduction des caractéristiques dynamiques d'une moto réelle au second plan. Ce prototype a été développé en mettant l'accent sur l'importance de contrôler facilement le simulateur par n'importe quel utilisateur (« *easy to ride* »), celui-ci devant être capable de tourner dans la direction désirée [Miyamaru et al., 2002]. Le modèle de véhicule a alors été entièrement repensé en reformulant les équations de base du contrôle dynamique fondé sur la dynamique d'une moto réelle à partir d'une enquête sur les actions exercées par les conducteurs en conduite sur moto réelle. Leur modèle se fonde alors sur un contrôle du véhicule par l'angle du guidon à basses vitesses, par le roulis à vitesses élevées et un contrôle combiné par l'angle du guidon et du roulis aux vitesses intermédiaires (les échelles de vitesses ne sont pas précisées ; Miyamaru et al., 2002). L'architecture du simulateur fut également modifiée en tenant compte des tests réalisés sur le premier prototype. Le mouvement de balancier, non nécessaire à la restitution des sensations d'accélération et décélération, a été abandonné pour ne garder que le mouvement de tangage suffisant pour restituer ces sensations.

Ce second prototype (figure 3.4) permettait ainsi de reproduire des mouvements selon 3 ddl, en tangage ( $\pm 10$  degrés), roulis ( $\pm 15$  degrés) et de rotation du guidon ( $\pm 30$  degrés). Yamasaki et al. [1998] ont déterminé quelle était la position des centres de rotation du roulis et tangage qui produisaient des sensations de conduite réalistes (voir chapitre 4, section 4.4 pour plus de détails). Questionnant le sentiment de stabilité et de contrôle directionnel, les auteurs ont montré que sur ce simulateur un positionnement du centre de roulis à 250 mm au-dessus du niveau de la route et du centre de tangage à 400 mm devant l'assise du conducteur permettait de générer une sensation de conduite similaire à celle d'une vraie moto. De manière similaire, les auteurs ont étudié l'angle de roulis et de tangage. Au vu de leur résultat, l'angle de roulis de la plate-forme mobile a été limité à 11 degrés pour les vitesses faibles (en dessous de  $25 \text{ km.h}^{-1}$ ) et 7 degrés pour les vitesses moyennes et élevées (supérieures à  $25 \text{ km.h}^{-1}$ ). Enfin, les auteurs ont indiqué qu'un angle de tangage de  $\pm 5$  degrés et une vitesse de  $10 \text{ deg.s}^{-1}$  étaient nécessaires pour obtenir une sensation de tangage réaliste [Yamasaki et al., 1998].



FIGURE 3.4 – Le prototype n°2 du simulateur Honda ; version commercialisée en 1996 (source : <http://world.honda.com/motorcycle-technology/sim/p3.html>)

Afin de rendre le dispositif plus compact et moins imposant que le prototype 1 (100 pouces de large, soit 254 cm), le dispositif de retour visuel était composé d'un écran statique large de 52 pouces - 132 cm - [Miyamaru et al., 2002]. Le dispositif de retour visuel permettait d'autre part de simuler l'inclinaison en roulis par une inclinaison de l'horizon visuel dans la direction opposée à celle du simulateur et le freinage du véhicule virtuel (figure 3.5) [Yamasaki et al., 1996]. Le système de restitution sonore, situé à l'avant du simulateur, utilisait du son stéréo.

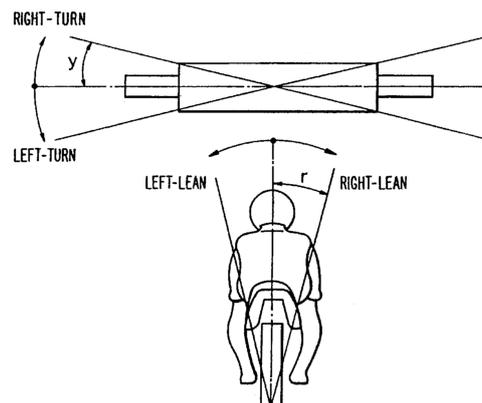


FIGURE 3.5 – Représentation schématique de la simulation de l'inclinaison par une inclinaison visuelle dans la direction opposée de celle du simulateur. Extrait de Yamasaki et al. [1996]

### 3.3.2 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 (non précisé) [Chiyoda et al., 2000]. Ce type de plate-forme (figure 3.6) 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 œuvre en raison de leur comportement hautement non-linéaire [Nehaoua, 2008].

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 [Chiyoda et al., 2000].

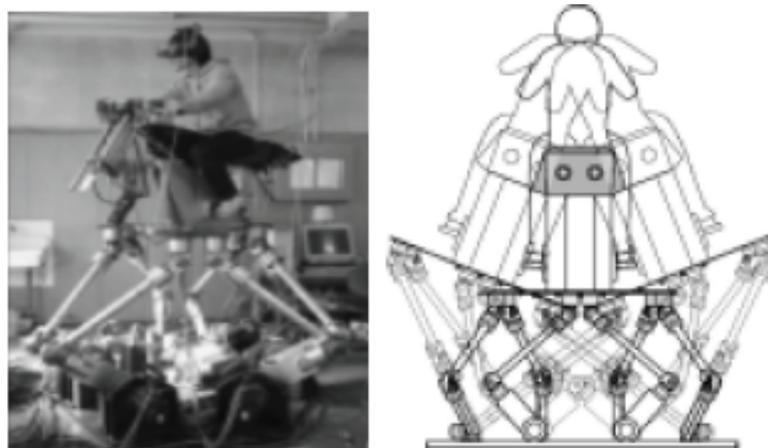


FIGURE 3.6 – Simulateur deux-roues de l'Université de Tokyo. Extrait de Chiyoda et al. [2000]

### 3.3.3 Le simulateur de l'université Nihon [Kageyama et Tagami, 2002]

Le simulateur de l'Université Nihon (Chiba, Japon) 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 de 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.

### 3.3.4 Le simulateur MORIS (Motorcycle Rider Simulator)

Le simulateur MORIS (figure 3.7), présenté au début des années 2000, est né du projet du même nom (MORIS) débuté en 1995. Ce projet a été mené par une collaboration entre différentes équipes : le laboratoire PERCRO (Perceptual Robotics Laboratory, Ecole Supérieure Sant' Anna, Pise, Italie) et des partenaires à la fois industriels (Piaggio, Hummanware en Italie et HEAD Acoustics en Allemagne) et académiques (Ecole Supérieure Sant' Anna, en Italie ; Université de Halmstad, en Suède ; Université de Bochum, en Allemagne). Ce projet avait pour but de développer un simulateur de deux-roues motorisé suffisamment robuste afin d'assister le design, la conception et le développement des véhicules de deux-roues motorisés et ainsi de diminuer le nombre de tests sur route nécessaires avant la mise en fabrication des prototypes élaborés.

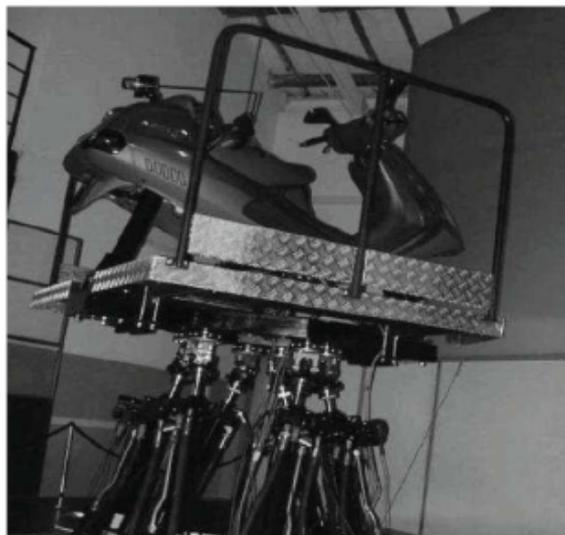


FIGURE 3.7 – Le simulateur MORIS. Extrait de Ferrazzin et al. [2001]

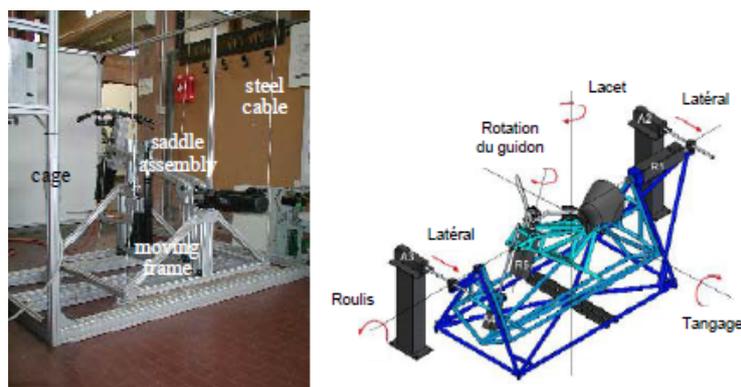
Ce simulateur a été développé afin de permettre 7 ddl : déplacements verticaux, latéraux, longitudinaux ; rotations en roulis, tangage, et lacet ; et rotation du guidon [Ferrazzin et al., 2001]. Les caractéristiques relatives aux différents ddl telle que l'amplitude des mouvements possibles, ne sont pas renseignées par les auteurs. Ce simulateur se présente comme un châssis de scooter fixé sur une plate-forme parallèle de type Gough-Stewart et est actionné par des vérins hydrauliques. A la base du scooter une protection latérale est rattachée à la plate-forme mobile pour prévenir la chute possible du conducteur (figure 3.7). En addition des organes standards d'un véhicule deux-roues motorisé (e.g., freins,

démarrateur, klaxon, etc.), un pot vibrant a été ajouté afin de reproduire les vibrations du moteur ainsi qu'un servomoteur offrant un couple max de 15 N.m et permettant de durcir la direction du guidon en fonction de la vitesse.

Le modèle dynamique mis au point [Ferrazzin et Barbagli, 2000; Ferrazzin et al., 2001] permet de résoudre des équations de mouvement en temps réel décrivant un système multi-corps qui se rapproche des caractéristiques géométriques, inertielles et mécaniques d'un véhicule réel. La base du modèle dynamique a 1 ddl, à l'aide duquel la direction longitudinale de la moto est élaborée, puis l'information est envoyée à deux modèles découplés calculant respectivement le mouvement vertical (à 2 ddl, modèle fondé sur le schéma de De Carbon (référence non précisée)) et le mouvement latéral (à 4 ddl, reposant sur le modèle de Weir (référence non précisée)). La restitution visuelle s'effectue par le biais d'un système de vidéo projection sur un écran plat fixé au mur face au simulateur. Le système de restitution sonore utilise un son spatialisé restitué au moyen d'un casque porté par le conducteur [Ferrazzin et al., 2001].

### 3.3.5 Le simulateur DIGEM (anciennement Fastbike)

Une autre équipe italienne, du 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 – le simulateur DIGEM – 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 3.8) 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].



(a) Extrait de Cossalter et al. [2004].

(b) D'après, Cossalter et al. [2010].

FIGURE 3.8 – Architecture du simulateur DIGEM.

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.

Le système de restitution visuelle de ce simulateur (figure 3.9) repose sur 3 écrans de projection de 1,5 x 2 m couvrant un champ visuel horizontal de 240 degrés dans le but d'améliorer au maximum 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.



FIGURE 3.9 – Simulateur DIGEM. Extrait de Cossalter et al. [2010]

### 3.3.6 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 (HRT) (figure 3.10).



FIGURE 3.10 – Simulateur Honda Riding Trainer (Source :<http://world.honda.com/news/2006/c060130RidingTrainer/>)

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 [Di Stasi et al., 2009]. 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.

### 3.3.7 Le simulateur IFSTTAR

Le développement du simulateur IFSTTAR (ou MSIS-IBISC-IEF) a débuté en France en 2007 (et se poursuit aujourd'hui), 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 la laboratoire Institut d'Electronique Fondamental (IEF, Université Paris-Sud XI, Orsay, France) [Nehaoua et al., 2011]. 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.

Ce simulateur permet de restituer un mouvement selon 5 ddl : roulis ( $\pm 12,5$  degrés), tangage ( $\pm 10$  degrés), lacet ( $\pm 10$  degrés). Le quatrième et cinquième ddl (figure 3.11) est un double retour d'effort au niveau du guidon. Le premier retour d'effort, par la manipulation de la distance entre le guidon et le corps de la moto, couplée aux actions d'accélération et de décélération, permet de générer un effort (de flexion ou d'extension) dans les bras du conducteur s'inspirant de celui observé en situation réelle du fait des mouvements du buste durant les phases d'accélération et de freinage. Le second permet de restituer le couple résultant du contact pneu-chaussée sur la colonne de direction de la moto.

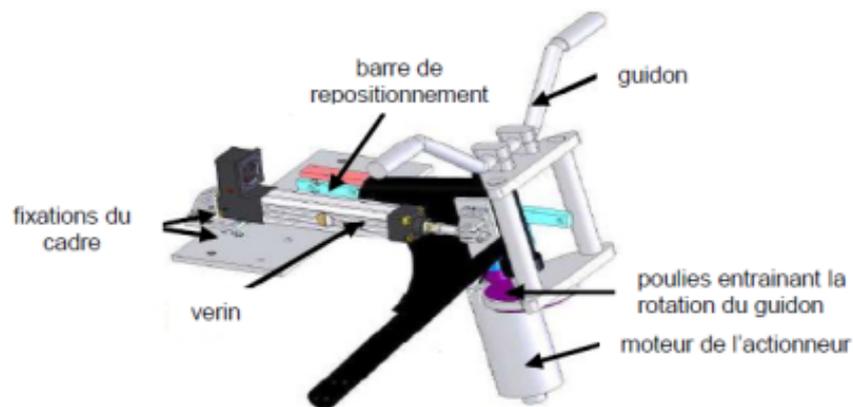


FIGURE 3.11 – Représentation du système mécanique produisant un double retour d'effort sur le guidon. Extrait de Nehaoua [2008]

Le simulateur utilise un châssis de moto réelle (Yamaha YBR, 125 cm<sup>3</sup>). Certains éléments (selle et réservoir) peuvent être échangés avec ceux d'une moto de plus grosse cylindrée. 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 in-

férieure du simulateur consistant en un bâti servant de support pour le montage des actionneurs (vérins électriques utilisés pour les mouvements en tangage et roulis) et de la glissière arrière (destinée au mouvement de lacet). L'ensemble des organes de commande d'origine (freins avant et arrière, embrayage, démarreur, klaxon, accélérateur, sélecteur de vitesse, clignotants) ont été conservés. Dans la première version du simulateur IFSTTAR (figure 3.12), la position des axes de rotation a été définie à partir de la cinématique d'une moto réelle. L'axe de roulis est pris dans le plan de symétrie de la moto. Le système de glissière fixé à l'arrière du bâti du simulateur permet de reproduire le mouvement de lacet (pour la reproduction, par exemple, d'un dérapage de la roue arrière). L'axe du tangage passe par l'arrière de la moto et est reproduit par un déplacement vertical de la fourche durant les phases d'accélération ou de décélération.

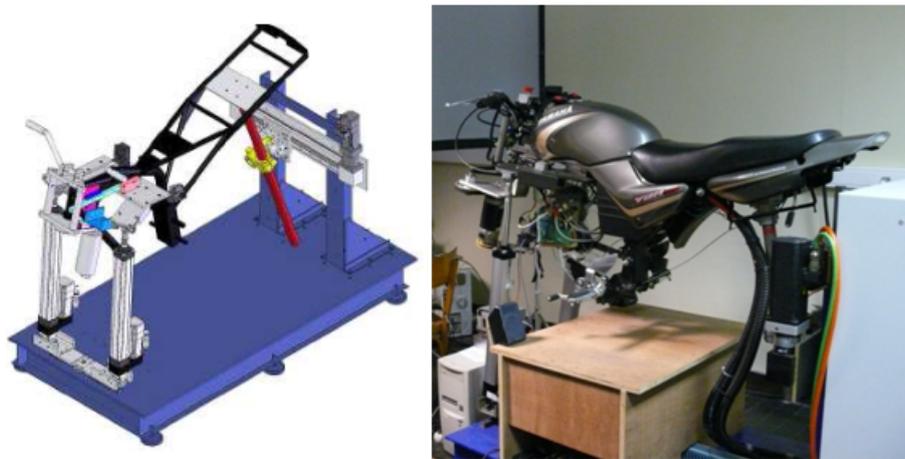


FIGURE 3.12 – Simulateur IFSTTAR, version initiale.

Toutefois, la position des différents axes a été modifiée fin 2009, avec l'objectif d'améliorer la sensation de freinage ou d'accélération lors du mouvement de tangage, menant ainsi à une deuxième version du simulateur (figure 3.13). Dans sa version actuelle, le simulateur présente deux rails fixés en position oblique respectivement sur la partie mobile (rail de couleur noire sur le cadre de la moto, voir figure 3.13) et sur la partie fixe (rail de couleur bleue constituant le bâti) de la plate-forme. Ces deux rails sont reliés par une rotule qui peut être placée à l'une des trois positions prévues. Le positionnement de la rotule a une influence sur les axes de rotation pour les mouvements de roulis et de tangage (voir chapitre 8, pour plus de détails). De plus, des capteurs d'effort ont été ajoutés au niveau des têtes de vérin pour connaître les mouvements (changements de position) du conducteur et les prendre en compte dans la simulation. Différentes positions de l'axe de tangage, lacet et roulis peuvent être évaluées afin de définir la configuration apportant des sensations de conduite satisfaisantes. Plusieurs modèles dynamiques de véhicule peuvent être utilisés sur le simulateur. Chacun de ces modèles repose sur un mode de calcul différent de la dynamique d'une moto « virtuelle ». Ces modèles incluent également le calcul des grandeurs (facteurs d'échelle) à restituer par les actionneurs (et le visuel). Au total trois modèles dynamiques de véhicule ont ainsi été développés : les deux premiers modèles reposent sur un contrôle de la direction assuré par des actions de contre-braquage alors que le modèle restant exploite des actions de braquage pour assurer le contrôle de la direction :

- (i) Le modèle « Physique », développé dans le cadre du projet SENSORIMOTO (projet national financé par la Fondation Sécurité Routière), repose sur les lois de la physique reproduisant ainsi la dynamique d'une moto réelle. Le véhicule se conduit par la technique de contre-braquage.

- (ii) Le modèle « Fonctionnel F1 » ne repose pas sur la dynamique d'une moto réelle mais sur les contraintes fonctionnelles 'déclarées' de motocyclistes experts reliant les actions réalisées sur la moto aux résultats attendus/voulus en termes de trajectoire (la trajectoire attendue par les motocyclistes ne correspondant pas forcément à celle d'une moto réelle). Le véhicule se conduit par la technique de contre-braquage.
- (iii) Le modèle « basique » ou « braquage » ne restitue l'inclinaison de la moto virtuelle que par une inclinaison de l'horizon visuel, aucune restitution inertielle ne peut être produite. Le véhicule se conduit par du braquage classique (pour virer à droite, le guidon doit être tourné vers la droite). Ce modèle est similaire à celui mis en œuvre sur le simulateur Honda Riding Trainer de Honda.

Les trois modèles ont fait l'objet d'une étude de validation présentée au chapitre 13 de ce manuscrit.

La restitution visuelle de ce simulateur peut s'effectuer par différents systèmes de projection :

- Sur un écran, de 1,77 m de large sur 1,28 m de hauteur, couvrant 72 degrés de champ de vision horizontal et 54 degrés de champ de vision vertical (pour une distance de 1 m entre l'écran et le simulateur),
- Sur un mur d'écrans, ce mur pouvant être composé de 1 à 6 écrans de 1,88 m de large sur 2,40 m de hauteur chacun (pour une distance de 1,63 m entre les écrans et le simulateur). Ce support de projection permet de modifier la taille du champ visuel horizontal selon le nombre d'écrans retenus, mais également le champ de vision vertical, par un redimensionnement de l'image projetée.

Le système de restitution sonore utilise un son spatialisé provenant de l'enregistrement de bruit moteur d'un véhicule automobile.



FIGURE 3.13 – Simulateur IFSTTAR, version actuelle.

### 3.3.8 Le simulateur MotorcycleSim [Stedmon et al., 2009]

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 3.14) 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. [2009] précisent que cette stabilité n'est pas totale et que les utilisateurs doivent déplacer le poids de leur corps sur la moto comme il le feraient en situation réelle. Une étude de validation du simulateur [Stedmon et al., 2009] a été réalisée dans ce mode "statique" (voir chapitre 4, section 4.4, pour plus de détails). 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 ( $\sim 2,5 \text{ m}^2$ ). Lorsque le conducteur négocie un virage, l'inclinaison en roulis de la moto virtuelle peut être 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.



(a) Source : <http://www.pacts.org.uk/docs/events/PACTs%20v3.pdf>.



(b) Extrait de Stedmon et al. [2009].

FIGURE 3.14 – Architecture du simulateur DIGEM.

### 3.4 Conclusion

A travers la présentation des simulateurs moto existants, on peut s'apercevoir que de multiples solutions techniques ont été explorées par les constructeurs, portées par l'intérêt récent donné à ce domaine de simulation. Il n'existe ainsi pas encore de consensus sur la conception mécanique et dynamique (modèles de véhicule, position des centres de rotation, etc.) des simulateurs de deux-roues motorisé en raison principalement du manque de données liées au comportement des motocyclistes en situation réelle. Aucune étude ne s'est encore intéressée aux modes de contrôle d'un deux-roues motorisé en situation réelle alors même que cette connaissance est critique pour la conception des modèles de véhicule. Par ailleurs, alors que certains auteurs suggèrent que le centre de rotation du roulis doit être situé au niveau de la tête du conducteur [Cossalter et al., 2004; Ferrazzin et al., 2001] afin que le conducteur conserve sa tête stationnaire par rapport à l'horizon, seul Yamasaki et al. [1998] ont conduit une étude pour tenter d'établir la position du centre de rotation générant une sensation de conduite proche de la conduite réelle. Or, leur résultat indique une position du centre de rotation de roulis en dessous du niveau de la tête (25 cm au dessus de la route), une telle position induisant la perception des accélérations au niveau de la tête du conducteur. Par conséquent, la reproduction de phénomènes physiques ne semble pas nécessaire pour produire une perception du mouvement proche de celle perçue sur un vrai véhicule.

En parallèle, on constate dans la littérature que l'essentiel des études sur les comportements des conducteurs de deux-roues motorisé (e.g., performance de conduite, détection de situation dangereuses, amélioration de l'attention sélective, charge mentale) ont été réalisées avec le simulateur Honda Riding Trainer [Bastianelli et Vidotto, 2007; Di Stasi et al., 2009; Liu et al., 2009a; Symmons et Mulvihill, 2011; Vidotto et al., 2008] ou encore à partir de « mise en situation », c'est-à-dire avec une moto installée devant des écrans mais sans aucune interaction possible avec le dispositif ni avec l'environnement virtuel [Hosking et al., 2010]. Cependant, le recours à de tels dispositifs pour l'étude des comportements des conducteurs pose alors le problème de leur validité. En effet, il apparaît primordial de s'assurer que la technologie utilisée permette de mesurer efficacement l'objet d'étude. Questionner la validité d'un dispositif est ainsi crucial avant toute utilisation de celui-ci. Une présentation détaillée du concept de validité sera donnée dans le chapitre suivant.

## Chapitre 4

# La validité des environnements virtuels

Le concept de validité se définit par essence comme le degré auquel un test mesure ce qu'il est supposé mesurer [Rudin-brown et al., 2009]. Dans la littérature, on peut observer différents sens rattachés au concept de validité ainsi qu'une confusion entre trois autres concepts : la fidélité, le réalisme et la présence. Ce chapitre se compose de quatre parties : (1) une analyse critique de ces concepts et, (2) de leur utilisabilité dans le domaine de la simulation de conduite, (3) la présentation des travaux de validation des environnements virtuels, et en particulier des simulateurs de conduite au travers des deux approches majeures mises en œuvre (l'approche « élément par élément » et l'approche « globale ») et d'une approche alternative (s'appuyant sur le concept de présence), (4) la description des études de validation de simulateurs moto les plus significatives.

### 4.1 Une conceptualisation variée de la validité

#### 4.1.1 Validité

On retrouve dans la littérature l'utilisation de différentes dimensions ou catégories sous-jacentes au concept général de **validité**, concept souvent employé pour l'évaluation des simulateurs et en particulier ceux destinés à constituer des outils de formation ou de recherche dans le domaine des facteurs humains. Dans le domaine issu des sciences sociales trois types de validité sont couramment utilisés dans la littérature [Blana, 1996; Kaptein et al., 1996; Reimer et al., 2006] : (i) *la validité de mesure* (« *measurement validity* ») se réfère au fait qu'un indicateur mesure bien le concept d'intérêt ; (ii) *la validité interne* (« *internal validity* »), se réfère au degré auquel les résultats obtenus (e.g., les différences observées au niveau du comportement ou performance des utilisateurs) ne peuvent être attribuées qu'aux seules variables manipulées expérimentalement ; (iii) *la validité externe* (« *external validity* ») qui se réfère à la capacité de généraliser les résultats obtenus dans un environnement spécifique avec un échantillon de population particulier à d'autres environnement, population, et période temporelle (e.g., dans quelle mesure le comportement observé sur simulateur peut-il être généralisé à la conduite en réalité). En revanche, dans le domaine spécifique de la simulation un langage différent avec une plus grande variété de concepts est utilisé pour discuter de la validité d'une simulation [Reimer et al., 2006]. Toutefois, Reimer et al. [2006] estiment que l'ensemble des conceptions (ou conceptualisations) de la validité employées dans le domaine de la simulation s'inscrivent dans les trois précédentes catégories de validité.

Parmi les différents types de validité abordés dans la littérature (voir Blana, 1996; Reimer et al., 2006; Stanton, 1996, pour une discussion plus approfondie sur ce sujet), on note la *validité faciale* qui se réfère

au degré de ressemblance entre le simulateur et un véhicule réel. Celle-ci n'affecte pas directement la validité des résultats mais plutôt la motivation et l'engagement de l'utilisateur en favorisant l'acceptation du simulateur [Stanton, 1996]. On distingue également la *validité concourante* qui est définie comme la capacité d'un test à distinguer les individus connus pour être différents (e.g., la vitesse moyenne obtenue en simulation de conduite doit être corrélée au nombre de procès-verbaux que les utilisateurs rapportent avoir été victimes, ce nombre renseignant indirectement sur les vitesses pratiquées).

Blaauw [1982], reprenant deux sous-aspects de la validité définis auparavant par Mudd [1968] et McCormick [1970], propose deux autres types de validité : (i) **la validité physique**, qui est définie par le degré de correspondance physique entre le simulateur et le véhicule réel au niveau des caractéristiques dynamiques et architecturales ; (ii) **la validité comportementale** qui établit la correspondance ou similitude entre le comportement de l'utilisateur sur simulateur et en situation réelle. Godley et al. [2002] fait remarquer que la littérature se réfère souvent à ces deux concepts de la validité sous les notions suivantes : *la fidélité des simulateurs* et *la validité prédictive*. Toutefois, Blaauw [1982] suggère que parmi ces deux aspects de la validité, l'aspect le plus important pour l'évaluation d'un simulateur est la validité comportementale. Il distingue de plus deux niveaux de validité inhérents à la validité comportementale : la *validité relative*, selon laquelle la comparaison entre les deux environnements (réel et virtuel) doit rendre compte de mesures de performance de même grandeur et allant dans le même sens ; la *validité absolue*, pour laquelle la comparaison entre les deux systèmes doit rendre compte de mesures identiques (valeurs numériques identiques).

Plus récemment, Malaterre et Fréchaux [2001] ont approfondi la définition de la validité proposée par Blaauw [1982] en distinguant quatre niveaux de validité des simulateurs. Ces quatre niveaux de validité correspondent à différents niveaux de similitude entre la conduite simulée et la conduite en situation réelle : (i) *la validité physique* (fidélité, identité des stimuli auxquels le conducteur est soumis) ; (ii) *la validité physiologique* ou *expérientielle* (similitude des sensations ressenties par le conducteur, ou encore jugement de ressemblance ou crédibilité subjective de la situation simulée) ; (iii) *la validité éthologique* (analogie des comportements observés) ; et (iv) *la validité psychologique* (similitude des mécanismes et du coût cognitif).

On peut remarquer que Malaterre et Fréchaux [2001] tout comme Godley et al. [2002] utilisent la notion de *fidélité* pour caractériser le sous-concept de validité physique. Toutefois, la fidélité est une notion complexe qui peut être appréciée à différents niveaux. Ces niveaux sont détaillés dans la section suivante.

### 4.1.2 Fidélité

Le concept de **fidélité** est un concept multidimensionnel très souvent divisé en sous-définitions. Mais, cette catégorisation n'est pas uniforme et varie selon les auteurs. A titre d'illustration, Rehmann et al. [1995] dénombrent au moins 22 définitions du concept de fidélité sur 30 ans de recherche, sans qu'il y ait accord sur une définition unique. Parmi ces définitions, nous pouvons distinguer celles qui ont des implications dans le domaine de la simulation en général (environnement virtuel et réalité virtuelle) [Burkhardt et al., 2003; Stoffregen et al., 2003] de celles qui ont des implications dans le domaine spécifique à la simulation de conduite [Liu et al., 2009b; Stanton, 1996].

L'utilisation de la notion de *fidélité de stimulus* est très fréquente dans la littérature et semble être considérée comme un moyen potentiel et privilégié afin de favoriser la fidélité d'un simulateur [Stoffregen et al., 2003]. Un état de fidélité de stimulus est produit seulement si en simulation aucun biais perceptif ne peut permettre à l'utilisateur de différencier l'environnement virtuel de celui qui a été simulé

(monde réel). Ceci implique une reproduction parfaite de la relation unique existant entre la réalité physique et les stimulations perceptives qu'elle crée. Cette notion de fidélité de stimulus est assimilée par certains auteurs [Godley et al., 2002; Malaterre et Fréchaux, 2001] au concept de validité physique : un haut degré de validité physique implique une reproduction parfaite des stimuli perceptifs créés dans le monde réel.

Pour évaluer la fidélité des simulations, Stoffregen et al. [2003] proposent deux critères distincts : **la fidélité subjective de l'expérience** (ou *fidélité expérientielle*) et **la fidélité de la performance** (ou *fidélité de l'action*). La première notion de fidélité (*la fidélité expérientielle*) est formalisée par ces auteurs à travers le concept de *présence* qui se définit comme le degré auquel une simulation produit une expérience subjective « d'être là » (« *being there* »). La présence est souvent considérée comme une illusion perceptuelle [Lombard et Ditton, 1997], qui soulève différentes interrogations et confusions qui seront abordées dans les deux prochaines sections. Cette première notion est également désignée dans la littérature sous la notion de *fidélité perceptive* [Burkhardt et al., 2003] et semble très proche d'un des concepts de la validité, *la validité expérientielle*, proposée par Malaterre et Fréchaux [2001]. La deuxième notion de fidélité, *fidélité de l'action*, peut être définie en termes de relation entre la performance dans la simulation et celle produite dans le monde réel. On retrouve également dans la littérature ce sous-concept sous le terme de *fidélité psychologique* [Burkhardt et al., 2003] ou encore sous le terme de *fidélité fonctionnelle* telle que définie par Moroney et Moroney [1998]. Quelques auteurs [Liu et al., 2009b; Stanton, 1996] renvoient le concept de fidélité fonctionnelle à une définition différente qui sera précisée un peu plus loin. Sous cette définition, la fidélité de l'action décrit les mêmes phénomènes que le concept de validité éthologique [Malaterre et Fréchaux, 2001] ou comportementale [Blaauw, 1982] présentés dans la section précédente. L'évaluation de la fidélité de l'action implique nécessairement une analyse (objective) des performances et comportements des utilisateurs en environnement réel et virtuel. En effet, ces derniers ne peuvent être observés de manière directe par une évaluation subjective.

Plus récemment, à partir d'une revue de littérature très complète Liu et al. [2009b], distinguent quatre principaux types de fidélité : la fidélité physique, la fidélité psychologique-cognitive, la fidélité de la tâche et la fidélité fonctionnelle. Tout d'abord, la *fidélité physique* est liée aux propriétés physiques de la simulation et se définit par le degré auquel le dispositif ressemble à l'environnement réel. Cette fidélité inclut trois sous-concepts : la fidélité audio-visuelle (très souvent étudié, cet aspect de la fidélité renvoie aux caractéristiques visuelle et auditive que le simulateur reproduit) ; la fidélité de l'équipement se réfère au degré auquel un simulateur réplique la technologie utilisée en réalité (hardware et software) ; la fidélité du mouvement renvoie au degré auquel un simulateur peut reproduire la sensation de mouvement ressentie par les utilisateurs dans l'environnement réel. Cet ensemble composant la fidélité physique est très proche de la notion de fidélité de stimulus, qui repose sur la reproduction 'exacte' des stimuli perceptifs [Stoffregen et al., 2003]. Par ailleurs, cette définition est similaire à celle évoquée sous le concept de validité physique [Blaauw, 1982; Malaterre et Fréchaux, 2001]. C'est pourquoi dans les études sur la simulation ces deux termes (validité et fidélité physique) s'emploient très souvent de façon interchangeable. La *fidélité psychologique-cognitive* se réfère quant à elle au degré auquel les facteurs psychologiques et cognitifs sont reproduits lors de la simulation et renvoie ainsi au degré auquel l'utilisateur est impliqué psychologiquement et cognitivement (*e.g.*, stress, charge mentale) d'une manière similaire à l'engagement induit par un dispositif réel. Cette définition est proche de la notion de fidélité psychologique formulée par Burkhardt et al. [2003]. En revanche, la *fidélité de la tâche* se réfère au degré auquel un simulateur reproduit les tâches qu'un environnement réel implique, *e.g.*, un haut niveau de fidélité implique ainsi que l'ensemble des tâches qui ont besoin d'être exécutées dans un véhicule doivent pouvoir être réalisées d'une manière similaire avec le simulateur (les tâches à reproduire dépendent de

l'objectif de la recherche). Enfin, de manière similaire à Stanton [1996], Liu et al. [2009b] définissent à partir de leur revue de littérature la *fidélité fonctionnelle* comme le degré auquel le simulateur se comporte et réagit (aux tâches et commandes exécutées par l'utilisateur) comme le véhicule réel.

Après avoir abordé les différents types de fidélité en usage, une description du concept de réalisme est présentée dans la prochaine section. Les recoupements de certaines définitions de ce concept avec celles de la fidélité sont précisés le cas échéant.

### 4.1.3 Réalisme

Le **réalisme** est un terme souvent utilisé pour qualifier et évaluer les environnements virtuels et constitue généralement un des objectifs majeurs de leurs conceptions. Cependant, les auteurs ne partagent pas tous la même définition du réalisme ni les mêmes critères, ce qui rend alors l'utilisation de ce terme problématique. L'utilisation la plus employée de la notion de réalisme renvoie à une évaluation subjective de l'utilisateur à la fois sur le niveau de ressemblance et de crédibilité de la situation ou environnement.

Toutefois, Burkhardt et al. [2003] dénombrent quatre autres définitions acceptées dans la littérature en référence à la notion de réalisme : (i) réalisme par l'intégration des lois de la physique, très souvent employé par les ingénieurs (appelée fidélité du stimulus selon Stoffregen et al., 2003) ; (ii) réalisme par la création d'une expérience perceptive 'crédible' si elle était vécue dans le monde réel, appelée également fidélité perceptive ou encore fidélité subjective de l'expérience [Stoffregen et al., 2003] ; (iii) réalisme par la reproduction d'un comportement semblable de l'utilisateur à celui exigé en situation réelle, appelé fidélité psychologique ou fidélité de l'action [Stoffregen et al., 2003] ; (iv) réalisme comme l'illusion d'une réalité qui n'existe pas, associé généralement à la notion de présence.

Bien que la notion de réalisme apparaisse souvent comme une propriété sine qua non à tout environnement virtuel, on peut constater qu'il s'agit d'une notion mal définie recouvrant par ailleurs les notions de fidélité et de présence. Burkhardt et al. [2003] suggèrent ainsi de remplacer la notion de réalisme qui, prise dans son acception globale, est source de confusion, par les niveaux de fidélité pertinents cités précédemment.

Il est généralement postulé l'existence d'un lien entre les deux premières définitions acceptées dans la littérature : une simulation intégrant les lois de la physique (e.g., mécanismes perceptifs naturels : vision stéréoscopique, champ visuel panoramique, etc.) conduirait à un plus haut niveau de fidélité subjective de l'expérience. En revanche, il est de plus en plus admis dans la littérature que la fidélité psychologique (ou fidélité de l'action) n'entretient pas de lien direct avec les autres niveaux de fidélités exposés précédemment, en particulier avec la fidélité du stimulus.

Enfin, le lien entre la fidélité de l'action et la dernière acception de 'réalisme' qui renvoie à la notion de présence semble être sujet à débat [Burkhardt et al., 2003; Mestre et Fuchs, 2006], en raison des résultats contradictoires mis en exergue dans la littérature. Une description détaillée du concept de présence est exposée dans la prochaine section.

### 4.1.4 Présence

#### 4.1.4.1 Une conceptualisation variée sous-tendant différentes approches philosophiques

Malgré le recours courant au terme « être là » [Heeter, 1992; Slater, 1999; Steuer, 1992] pour illustrer le sentiment de présence, la définition du concept de présence n'est pas aussi simple. A partir d'une

revue de littérature très complète, Lombard et Ditton [1997] mettent en évidence six principales conceptualisations au total du concept de présence qui sont présentées ci-dessous.

- (i) *La présence comme richesse sociale*, est établie pour les communications interpersonnelles et se réfère au degré auquel un médium (*i.e.*, une interface) est perçu comme sociable, chaleureux, sensible, personnel ou intime lorsqu'il est utilisé pour interagir avec d'autres utilisateurs.
- (ii) *La présence comme réalisme*, se rapporte au degré auquel le médium peut produire des représentations précises, *i.e.*, réalisme apparent, d'objets, d'événements ou d'individus.
- (iii) *La présence comme déplacement*, est décomposée en 3 types de déplacement : (i) « tu es là » décrivant le sentiment que l'utilisateur a été transporté à un autre endroit ; (ii) « c'est ici » faisant référence à la présence d'objets, contenus dans un endroit, qui sont transportés (apportés) à l'utilisateur ; ou (iii) « nous sommes ensemble » décrivant le sentiment de co-présence dans un espace partagé par au moins deux orateurs (*e.g.*, vidéo conférence).
- (iv) *La présence comme immersion*, se réfère au degré auquel l'environnement physique réel est exclu. La « présence comme immersion » implique à la fois une immersion perceptive liée aux éléments technologiques (objectivement mesurable) et une immersion psychologique liée à un état de l'utilisateur (subjectivement mesurable). Le concept d'immersion sera précisé p. 62.
- (v) *La présence comme acteur social avec une interface*, décrit le degré auquel l'utilisateur répond socialement à une représentation d'une personne à travers une interface (*e.g.*, « The tamagotchi », animal virtuel, qui a besoin d'être constamment nourri, de faire de l'exercice, etc.).
- (vi) *La présence comme acteur social*, décrit le degré auquel l'interface est elle-même perçue comme une entité ou un acteur social. Ceci implique des réponses de natures sociales de l'utilisateur aux informations fournies par l'interface elle-même et non plus aux entités sociales (personnages virtuels).

Selon ces auteurs, ces différentes conceptualisations partagent une même idée centrale. Lombard et Ditton [1997] formulent ainsi cette idée centrale sous la définition suivante de la présence : « une illusion perceptive de non-médiation ». Cette définition indique que le sentiment de présence apparaît lorsque la personne répond et agit comme si aucune interface n'était présente, la personne n'ayant plus conscience de la présence d'interfaces et donc du rôle joué par ces dernières. L'effacement des interfaces permet ainsi de ne pas entraver l'illusion ; en conséquence, l'expérience est vécue par la personne comme non-médiatisée et celle-ci se sent alors présente dans l'environnement virtuel. Par cette définition, la présence est ici considérée comme une illusion impliquant que l'utilisateur soit conscient à tout moment d'utiliser une interface.

Cependant, IJsselsteijn et al. [2000] estiment que les différents concepts identifiés par Lombard et Ditton [1997], présentés ci-dessus, peuvent être regroupés de façon simplifiée en seulement deux catégories : physique et sociale. La première catégorie - *la présence physique* - décrit le sentiment d'être physiquement situé à un endroit, alors que la seconde catégorie - *la présence sociale* - décrit le sentiment d'être ensemble, en interaction sociale avec un partenaire virtuel ou de communication situé dans un endroit lointain. A l'intersection de ces deux catégories, IJsselsteijn et al. [2000] décrivent le concept de *co-présence*, identifié également par Schroeder [2002], comme le sentiment d'être ensemble dans un espace médié. Ce dernier concept combine ainsi les caractéristiques de la présence sociale et physique.

En raison d'une multiplicité de définitions du concept de présence, plusieurs équipes [Bouvier, 2009; Coelho et al., 2006; Mantovani et Riva, 1999; Nunez et Blake, 2003; Schuemie et al., 2001; Zahorik et Jenison, 1998] suggèrent que le sens donné à la présence est probablement lié de près au concept

que les chercheurs ont de la réalité. Leurs définitions de la présence semblent refléter leurs adhésions à différentes positions ontologiques. On peut alors distinguer de manière grossière trois approches philosophiques différentes : *l'approche technologique*, *psychologique*, et *l'approche écologique*. Les deux premières positions philosophiques sont souvent regroupées ensemble sous le terme d'*approche rationnelle* [Zahorik et Jenison, 1998].

La première approche, *l'approche technologique*, définit le système de réalité virtuelle comme une collection de machines spécifiques et considère la présence comme un épiphénomène de la simulation immersive permise par la réalité virtuelle (ses propriétés physiques) [Coelho et al., 2006]. La présence est alors la conséquence de la technologie mise en œuvre, elle est exclusivement dépendante de la stimulation des sens de l'utilisateur [Biocca, 2003]. Bien que l'approche technologique ne nie pas l'existence d'une composante psychologique aux systèmes de réalité virtuelle, cette composante n'est simplement pas incluse dans la définition d'un système de réalité virtuelle [Coelho et al., 2006]. Biocca [2003] dénomme cette approche comme le modèle technologique à 2 pôles mais préfère la reformuler sous l'expression : « l'hypothèse de l'immersion sensorimotrice ». Cette « hypothèse » avance la supposition que l'utilisateur ne peut être qu'à un seul des deux endroits : l'environnement physique (« *physical space* ») ou l'environnement virtuel (« *virtual space* »). Slater et al. [1994a] précise qu'un haut niveau de présence dans un environnement virtuel nécessite un faible niveau de présence dans l'environnement physique et vice-versa. Cette position philosophique constitue l'approche dominante dans le domaine de la réalité virtuelle. Parmi les définitions de cette approche, on retrouve principalement celles associées à la perception sensorielle comme à travers l'expression « être là » [Ellis, 1991; Slater, 1999] ou l'image d'une illusion perceptive [Lombard et Ditton, 1997; Slater, 2002]. Ces définitions suggèrent que la présence ressentie sera d'autant plus forte que les qualités techniques des interfaces (immersion, interactions) seront élevées.

Par opposition, *l'approche psychologique* est elle centrée sur l'individu et définit l'expérience comme une possible expérience en dehors d'un environnement de réalité virtuelle [Biocca, 2003]. Selon Coelho et al. [2006], l'interaction avec le monde artificiel offre à l'utilisateur un sentiment d'immersion et le monde généré par ordinateur devient le monde de l'utilisateur. L'immersion constitue de ce point de vue le résultat de l'interaction entre l'homme et l'environnement et non plus une composante technologique de réalité virtuelle. L'approche psychologique peut se caractériser par l'observation intitulée le paradoxe du livre [Biocca, 2003]. Le problème (ou paradoxe) relevé ici peut se résumer au fait suivant : bien qu'un livre ne possède aucune propriété d'immersion sensorimotrice, centrale à l'approche technologique, les livres peuvent pourtant générer un sentiment de présence.

En réponse à cette observation, Biocca [2003] propose l'introduction d'un troisième pôle : *l'espace imaginaire*. La puissance de l'espace imaginaire permettrait de surpasser le manque d'immersion sensorielle des livres favorisant alors l'apparition d'un sentiment de présence chez le lecteur. Biocca [2003] suppose qu'à tout moment l'utilisateur d'un système se construit un modèle mental de l'espace autour de son corps. Ce modèle mental de l'espace, définissant le sentiment d'être physiquement présent (ressenti par l'utilisateur) est dominé par les informations spatiales d'un des trois espaces (imaginaire, physique, virtuel). Selon cette approche, la présence oscille donc entre ces trois pôles : « à n'importe quel moment dans le temps, les utilisateurs peuvent ressentir le sentiment d'être physiquement présent dans un seul des trois espaces : l'environnement physique, imaginaire, ou virtuel » [Biocca, 1997, p. 21]. Toutefois, cette approche est critiquée par plusieurs auteurs de l'approche technologique, dont Slater [2003], qui soutiennent qu'il ne faut pas confondre la forme et le contenu du média au risque de confondre la pré-

sence avec l'implication, l'engagement de l'utilisateur ou les émotions.

La troisième approche, *l'approche écologique*, est basée sur la théorie écologique de la perception [Mantovani et Riva, 1999; Riva, 2009; Riva et al., 2004a, 2011; Zahorik et Jenison, 1998] issue des travaux du psychologue Gibson J.J et du philosophe Heidegger M. Selon cette approche, la présence est liée à l'action dans l'environnement. Partisans de cette approche, Zahorik et Jenison [1998, p. 87] considèrent que « la présence est équivalente à entreprendre avec succès des actions dans l'environnement ». Par cette définition, Zahorik et Jenison [1998] soulignent la nécessité que l'environnement réponde de manière logique et en accord avec les attentes de l'utilisateur, lorsque ce dernier interagit avec l'environnement virtuel. Ainsi, les réponses de l'environnement se doivent d'être similaires à celles de l'environnement réel dans lequel notre système perceptif est impliqué. Le couplage perception-action est par conséquent considéré par ces auteurs comme essentiel pour déterminer dans quelle mesure les actions sont entreprises avec succès dans l'environnement. Ces actions entreprises avec succès constituent à leurs yeux une condition nécessaire et suffisante pour générer un sentiment de présence. Toutefois, Floridi [2005] critique l'affirmation de Zahorik et Jenison en pointant le fait que cela ne s'applique pas pour la présence passive, *e.g.*, présence sans interaction observable.

Récemment, Slater et al. [2009] se rapprochent de la thèse de Zahorik et Jenison [1998] et présentent la présence comme enracinée dans l'activité soulignant ainsi l'importance des réponses des personnes à l'environnement et leurs capacités à modifier activement celui-ci. Slater et ses collègues [2009] ajoutent également que le sentiment de présence jaillit seulement quand il existe une substitution avec succès des informations sensorielles réelles par celles générées virtuellement : l'utilisateur forme alors des percepts à partir de ces informations sensorielles, répond et agit à celles-ci comme si elles sont réelles. Cette conceptualisation inclut toujours le sentiment « d'être là » mais souligne avant tout l'importance de l'interaction et la capacité d'interagir avec l'environnement puisque « le fait de répondre comme si c'était réel implique de manière implicite l'interaction » [Slater et al., 2009, p. 195]. La présence est alors définie comme la capacité des personnes à répondre à des informations sensorielles générées virtuellement comme si elles étaient réelles [Sanchez-vives et Slater, 2005; Slater et al., 2009].

Situé à la jonction des trois approches présentées ci-dessus, le concept de présence soutenu par Bouvier [2009] met en exergue à la fois l'importance de la technologie pour l'immersion et l'interaction (approche technologique), et celle de la dimension cognitive (approche psychologique) relative à la participation de l'utilisateur à l'émergence du sentiment de présence. Il positionne également la notion d'affordance (*i.e.*, possibilités que l'environnement offre aux individus) au centre de son modèle de la présence soulignant ainsi une forte dimension écologique. Bouvier [2009] considère la présence comme « *le sentiment d'exister dans un monde autre que le monde physique où notre corps se trouve* » (cité originalement en italique, p. 49). Le sentiment d'exister étant lié non seulement aux stimulations sensorielles mais aussi aux possibilités d'action dans l'environnement, Bouvier suggère l'ajout, au concept de présence, d'une dimension relative aux actions de l'utilisateur dans l'environnement : *la présence d'action*. La présence d'action reflète le degré auquel l'utilisateur a conscience de ses actes et de leurs portées pour pleinement incarner son rôle. L'expérience de Milgram revisitée par Slater et al. [2006] dans un environnement de réalité virtuelle retranscrit parfaitement cette nouvelle dimension. En effet, les individus infligeant les décharges électriques à leurs victimes virtuelles ressentent des réactions physiologiques, émotionnelles ou éthiques traduisant l'apparition d'une présence d'action. Bouvier [2008] souligne l'importance de cette dimension pour les applications de réalité virtuelle comme la simulation de vol, de combat ou les entraînements à des actes chirurgicaux, en particulier lors de manœuvres d'urgence.

#### 4.1.4.2 Facteurs de la présence

Un nombre élevé de facteurs pouvant influencer la présence a été souligné dans la littérature, plusieurs revues détaillées de ces déterminants de la présence ont été publiées par Schuemie et al. [2001], Lombard et Ditton [1997], Sadowski et Stanney [2002] ou encore IJsselsteijn et al. [2000]. Ce dernier s'est efforcé de réduire l'ensemble des facteurs mentionnés dans la littérature à deux catégories générales de variables : **les caractéristiques du média** et **celles de l'utilisateur**.

**Les caractéristiques de l'utilisateur** peuvent inclure l'expérience de l'utilisateur avec le média utilisé, leur volonté d'entrer dans le 'jeu', leur engagement, leur attention ou d'autres caractéristiques individuelles comme l'âge ou le genre.

**Les caractéristiques du média** sont elles divisées en deux-sous catégories : (i) les variables relatives à la *forme du média* qui se réfèrent aux propriétés ou caractéristiques technologiques du système, regroupées par définition sous les concepts d'*immersion* et *interaction*, participant à rendre l'interface aussi transparente que possible ; (ii) les variables relatives au *contenu de l'expérience* se référant aux éléments non-technologiques incluant par exemple les objets, personnages, histoire ou événements représentés par le média.

Pour comprendre ce concept de présence, il est important de comprendre les déterminants de ce concept (figure 4.1). Une vue d'ensemble des variables qui peuvent influencer l'apparition du sentiment de présence est exposée dans les paragraphes suivants, en reprenant et précisant les trois catégories (forme du média, contenu de l'expérience et caractéristiques de l'utilisateur) exposées brièvement ci-dessus.

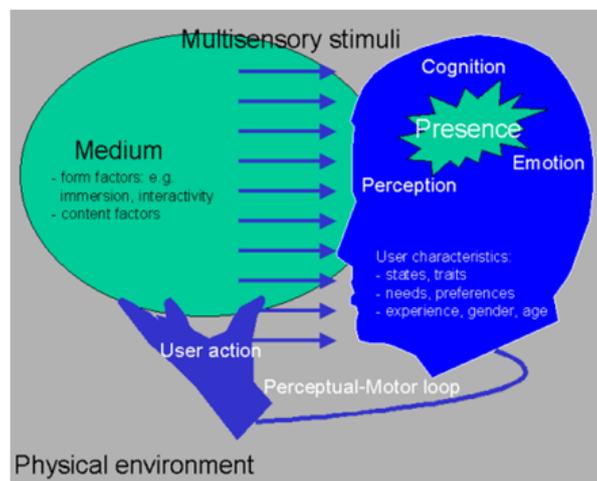


FIGURE 4.1 – Illustration de l'expérience de présence et de ses déterminants. Extrait de IJsselsteijn [2002].

##### 4.1.4.2.1 La forme du média

**Immersion** Il s'agit d'un des termes les plus couramment rencontrés dans la littérature sur la 'présence' et très souvent employé (e.g., immersion dans un environnement virtuel, systèmes immersifs ou utilisateur immergé) dans le domaine plus général de la réalité virtuelle. Bien que la notion d'immersion

puisse se définir de manière générique comme le degré auquel un individu est enveloppé par l'environnement virtuel [Jordan, 2010], la signification de cette notion est discutée par deux écoles de pensée [Sadowski et Stanney, 2002]. La position dominante et courante supportée par une majorité de chercheurs s'accorde à considérer l'immersion comme une description quantifiable de la technologie utilisée pour fournir les entrées multisensorielles à l'utilisateur [Bystrom et al., 1999; Draper et al., 1998; Mestre et Fuchs, 2006; Slater et al., 1996; Slater et Wilbur, 1997] décrivant ainsi l'immersion dans les termes des dispositifs logiciels et matériels particuliers utilisés [Burkhardt et al., 2003]. L'immersion correspondrait ainsi « au degré et à la qualité avec lesquels l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action » [Burkhardt et al., 2003, p. 4].

Avec une description plus approfondie, Slater et Wilbur [1997] suggèrent que l'immersion décrit « dans quelle mesure les systèmes de restitution sont capables de délivrer une illusion de réalité aux sens de l'utilisateur qui soit **large** (*extensive*), **englobante** (*surrounding*), **exclusive** (*inclusive*), et **vive** (*vividness*) ». On peut voir dans ces quatre descripteurs des conditions pré-requises pour disposer d'une immersion de qualité : **(i) l'illusion est d'autant plus large** qu'il y a plus de systèmes sensoriels inclus (redondance sensorielle) : l'immersion sera complète si l'ensemble des sens de l'utilisateur est stimulé [Dinh et al., 1999; Steuer, 1992]; **(ii) l'illusion est d'autant plus englobante** que la reproduction des modes naturels de présentation sensorielle y est favorisée comme la stéréopsie visuelle [Freeman et al., 1999, 2000; Hendrix et Barfield, 1996a; IJsselsteijn et al., 2001] et auditive [Hendrix et Barfield, 1996b; Larsson et al., 2004, 2005; Riecke et al., 2009; Valjämäe, 2005] ou encore le champ visuel panoramique [Hendrix et Barfield, 1996a; Lin et al., 2002; Prothero et Hoffman, 1995; Tan et al., 2003]; **(iii) l'illusion est d'autant plus exclusive** que toutes sources sensorielles en d'autres termes provenant du monde physique réel, sont éliminées et exclues [Schubert et al., 2000] et que le système utilisé est « transparent » [Lombard et Ditton, 1997]; **(iv) l'illusion est d'autant plus vive** que l'information sensorielle générée par la technologie utilisée est riche (*e.g.*, résolution et fidélité des stimuli pour chaque modalité; Steuer, 1992). Slater et al. [1996] ajoutent également à cette liste (des quatre descripteurs) un cinquième descripteur du fait que l'immersion nécessite qu'il y ait une **cohérence** (« *match* ») spatiale et temporelle entre les stimuli : entre l'information générée dans le système virtuel et les retours proprioceptifs (feedbacks) ressentis par l'utilisateur dus à un mouvement corporel.

D'après la caractérisation de l'immersion réalisée à partir de ces cinq descripteurs, l'immersion semble par essence liée à la nature multimodale de la perception et aux aspects interactifs de l'expérience dans un environnement virtuel [Mestre et Fuchs, 2006]. Par ailleurs, on peut noter que ces propriétés, suggérées par Slater et Wilbur [1997], sont très proches de celles formulées par Burkhardt et al. [2003, p. 5] qui suggèrent que « le degré d'immersion se caractériserait au moins par : a) le sous-ensemble des modalités mises en œuvre dans l'interaction ; b) les propriétés (degré de complétude, qualité, paramètres du signal) des dispositifs d'interaction pour chacune des modalités visées ; c) la cohérence interne et la latence globale de l'information et des réactions délivrées en temps réel par le système ; d) les propriétés de l'environnement physique dans lequel se déroule l'expérience ». Cette caractérisation de la notion d'immersion est similaire à la notion théorique de « fidélité du stimulus » privilégiée par Stoffregen et al. [2003], et définie comme un indicateur de la distance entre le monde physique et sa simulation.

Une approche alternative à celle-ci, constituant une deuxième école de pensée, est soutenue par une minorité de chercheurs [Bangay et Preston, 1998; Witmer et Singer, 1998]. Witmer et Singer [1998, p. 227] qui définissent ainsi l'immersion comme « un état psychologique caractérisé par la perception d'être enveloppé par, inclus dans, et interagissant avec un environnement qui fournit un flux continu de

stimuli et d'expériences »<sup>1</sup>. L'immersion est ainsi suggérée par Witmer et Singer [1998] comme un état psychologique et subjectif ne pouvant être mesuré directement. Selon eux, l'immersion peut se définir comme quelque chose que l'individu expérimente, en d'autres termes comme la réponse d'un individu à un environnement virtuel. Cette définition offre une perspective complètement différente de la notion d'immersion. Selon ces auteurs, différents facteurs peuvent influencer l'immersion comme l'isolation de l'environnement physique, la perception de se sentir inclus dans l'environnement virtuel, les modes naturels d'interaction et de contrôle, et la perception du mouvement propre. Ils suggèrent également qu'un environnement virtuel produisant un plus grand sentiment d'immersion produira un niveau plus important de présence.

Toutefois, leur définition de l'immersion se situe à un niveau psychologique introduisant en conséquence une confusion avec celle du sentiment de présence. C'est pourquoi Slater [1999] critique l'approche de Witmer et Singer [1998] en soulignant que celle-ci confond les propriétés objectives et physiques de la technologie relative aux environnements virtuels avec les aspects subjectifs et expérientiels de la présence. Slater [2003] suggère que des personnes différentes peuvent vivre différents niveaux de présence pour un même système immersif et que la réciproque est également vraie, c'est-à-dire que différents systèmes immersifs peuvent potentiellement générer le même niveau de présence chez différents utilisateurs. Par conséquent, Slater [2003] estime que la présence et l'immersion sont logiquement séparables même s'ils sont probablement fortement liés empiriquement.

Nous choisirons d'utiliser dans ce manuscrit la définition d'immersion de Burkhardt et al. [2003, p. 4], qui est : « l'immersion correspond au degré et à la qualité avec lesquels l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action ». Elle permet de distinguer l'expérience vécue par l'utilisateur (présence) de la technologie utilisée pour la générer (immersion).

Enfin, bien que considérée par de nombreux auteurs comme une condition nécessaire, l'immersion ne semble pas pour autant constituer une condition suffisante à elle-seule pour générer et maintenir la présence [Slater, 2002]. Baños et al. [2004] suggèrent que la présence ne serait pas fonction de manière directe de l'immersion soulignant implicitement que d'autres facteurs doivent certainement entrer en jeu. D'après Steuer [1992] l'interaction constitue l'un de ces facteurs et apparaît selon lui comme une condition importante pour tendre vers ce sentiment.

**Interaction** Elle est également considérée comme un des facteurs clés favorisant l'apparition et le maintien du sentiment de présence. En effet, la capacité d'interagir avec l'environnement semble être parfois suggérée de manière implicite ou explicite par de nombreux auteurs comme une ou même la cause principale du sentiment de présence [Lombard et Ditton, 1997]. Ce constat semble évident si l'on considère un instant les théories écologistes [Gibson, 1979; Mantovani et Riva, 1999; Riva, 2009; Zahorik et Jenison, 1998] qui mettent l'accent sur le rôle de l'interaction entre l'individu et l'environnement, notamment au travers du couplage perception-action, dans la production du sentiment de présence. Le concept d'interaction, concept complexe et multidimensionnel, a été défini par Steuer [1992, p. 14] comme « le degré auquel les participants peuvent participer en modifiant en temps réel la forme et le contenu de l'environnement médié ». Selon Lombard et Duch [2001], l'interaction n'est pas dichotomique (un média est interactif ou ne l'est pas) mais elle peut varier en degré (de non-interactif à hautement interactif) et aussi en type (l'utilisateur pouvant influencer différents aspects de formes ou de contenus).

---

1. Citation de Witmer et Singer [1998, p. 227] définissant la présence : " a psychological state characterized by perceiving oneself to be enveloped by, included in, and interacting with an environment that provides a continuous stream of stimuli and experiences".

Toutefois, le degré par lequel un média peut être considéré comme interactif dépend d'un nombre important de variables connexes [Schuemie et van der Mast, 1999; Steuer, 1992]. Lombard et Ditton [1997] en proposent cinq : (i) le nombre d'entrées sensorielles (de l'utilisateur) que le média accepte et auquel il répond ; (ii) le nombre (et type) de caractéristiques de l'expérience médiée qui peuvent être modifiées par l'utilisateur ; (iii) le degré de contrôle de l'utilisateur sur chaque attribut de l'expérience médiée ; (iv) le degré de correspondance entre le type d'entrées sensorielles de l'utilisateur et le type de réponse du média (e.g., jongler des balles virtuelles avec ses propres mains ou en cliquant sur une souris) ; (v) la vitesse avec laquelle le média répond aux entrées sensorielles de l'utilisateur (actions).

#### 4.1.4.2.2 Le contenu du média

Le contenu fait référence dans la littérature à tout ce qui donne du sens et un intérêt à l'expérience en incluant de manière indifférenciée les objets, les acteurs, les musiques, les événements ou l'histoire formant l'environnement. La nature de la tâche ou de l'activité constitue certainement une part importante du contenu du média intervenant dans la génération du sentiment de présence. Le type de la tâche mais aussi le niveau de difficulté de celle-ci, ainsi que le degré auquel le contrôle de la tâche paraît manuel ou automatique peuvent influencer le sentiment de présence [Heeter, 1992; Sheridan, 1992]. De plus, il peut sembler au premier abord que plus la durée de l'expérience (et donc de la tâche) est longue plus le sentiment de présence devrait augmenter étant donné qu'avec l'augmentation de la durée d'exposition, l'utilisateur devient plus familier à la tâche et au dispositif de réalité virtuelle. Cependant, Stanney et al. [2002] mettent en évidence que cette pensée commune est fautive et que le sentiment de présence ne semble pas augmenter par de longues expositions. Stanney et al. [2002] suggèrent ainsi que seulement 15 minutes d'exposition suffisent pour promouvoir un sentiment de présence chez les utilisateurs. Stanney et al. [2002] recommandent un temps d'exposition entre 15 et 30 minutes pour permettre une adaptation des mouvements de l'utilisateur avec l'environnement virtuel tout en limitant l'apparition de symptômes liés au mal du mouvement. Au contraire, une exposition prolongée (au-delà de 30 minutes) semble augmenter considérablement le niveau de malaise : une augmentation de 36 % des scores obtenus au *Simulator Sickness Questionnaire* [Kennedy et al., 1993] pour les participants exposés à des durées de 45 et 60 minutes comparés à ceux exposés à une durée de 15 minutes.

D'autre part, les émotions générées par l'expérience d'un média sont perçues par certains auteurs comme étant également un facteur d'influence du niveau de présence [Baños et al., 2004, 2008; Bouvier, 2008; Huang et Alessi, 1999; Riva et al., 2007; Västfjäll, 2004]. Ces études laissent par ailleurs supposer qu'un faible niveau d'immersion peut être compensé par une expérience médiée riche émotionnellement. Ceci expliquerait pourquoi lorsque l'immersion est réduite et qu'il n'y a pas d'interaction, les spectateurs (ou lecteurs) sont capables en plus de ressentir différentes émotions d'expérimenter également un sentiment de présence. Toutefois, Riva et al. [2007] met en évidence l'existence d'une relation bidirectionnelle entre le sentiment de présence et les émotions, au moins lorsque le média contient des émotions relatives à l'anxiété. L'auteur suggère ainsi que si le média utilisé n'est pas capable de générer un sentiment de présence alors même qu'il possède un contenu émotionnel, la réponse émotive créée chez l'utilisateur sera probablement faible.

#### 4.1.4.2.3 Les caractéristiques de l'utilisateur

L'importance des caractéristiques de l'utilisateur comme déterminants de la présence peut se témoigner par les observations suivantes : « Confrontées à un même système immersif, des personnes

différentes peuvent éprouver des niveaux de présence différents, et des systèmes immersifs différents peuvent également provoquer un même niveau de présence chez différentes personnes » [Slater, 2003, p. 2] ; et « Le même contenu et forme du média peuvent générer un sentiment de présence chez un utilisateur et non chez un autre, ou peut générer un sentiment de présence chez le même utilisateur à une occasion mais pas à une autre » [Lombard et Ditton, 1997, section 3]. Ces observations soulignent le fait que bien que l'immersion et l'interaction soient nécessaires pour tendre vers un sentiment de présence et que les contenus du média peuvent également influencer sur ce sentiment de présence, d'autres déterminants - les caractéristiques de l'utilisateur - entrent en jeu et n'en sont pas moins importants, même si très peu de recherches ont été conduites sur ces déterminants. Ces caractéristiques se réfèrent à la fois aux capacités cognitives, motrices ou sensorielles de l'utilisateur mais aussi aux expériences préalables avec l'environnement médié, et à l'engagement de l'utilisateur vis-à-vis de l'expérience [Ijsselstein et al., 2000; Lombard et Ditton, 1997]. Différents auteurs accordent ainsi une grande importance à l'attention ou l'engagement pour expliquer l'apparition du sentiment de présence [Bystrom et al., 1999; Riva et al., 2004b; Riva, 2009; Waterworth et Waterworth, 2001; Witmer et Singer, 1998; Wirth et al., 2007].

Selon Witmer et Singer [1998] le niveau de présence ressenti par un utilisateur dépend du degré de personnalité de l'utilisateur. Ces auteurs ont développé un questionnaire afin d'évaluer la propension des utilisateurs à devenir engagés et immergés dans différentes situations, appelé *Immersive Tendency Questionnaire* (ITQ). L'ITQ fournit ainsi une mesure des différences interindividuelles (trouvées dans les différents niveaux de sentiment de présence ressentis par différents utilisateurs pour un même média). Ce questionnaire est devenu un classique dans les études impliquant des médias susceptibles de générer un sentiment de présence. Blake et al. [2000] mettent en évidence l'existence de corrélations positives entre le questionnaire de propension à l'immersion (ITQ) et deux questionnaires différents mesurant le sentiment de présence (*Presence Questionnaire* - PQ - de Witmer et Singer, 1998 ; et le *Slater Usoh Steed Questionnaire* - SUS - de Slater et al., 1994a). Le fait que la relation existe entre deux questionnaires de présence distincts soutient le fait que le résultat trouvé n'est pas qu'un simple artefact d'une échelle particulière et confirme en conséquence la relation supposée entre les tendances immersives et la présence.

La relation entre le champ de représentation de référence (ou dominant) des individus et le sentiment de présence a également été mise à l'épreuve. Slater et Usoh [1994] utilisent une technique thérapeutique connu sous le nom de Programme Neuro-Linguistique (*NeuroLinguistique Programming*- NLP) afin d'évaluer le système perceptif dominant ou préférentiel (visuel, auditif ou kinesthésique) des individus. L'hypothèse de ce modèle est qu'une expérience subjective est codée sous les termes de trois principaux systèmes de représentation (visuel, auditif, kinesthésique) et que les individus ont une préférence pour un des systèmes de représentation. Ces auteurs fournissent plusieurs preuves empiriques de relations existantes entre le champ de représentation dominant et le niveau de présence [Slater et Usoh, 1994; Slater et al., 1995a].

En plus de l'ensemble des facteurs mentionnés ci-dessus, beaucoup d'autres facteurs (e.g., l'âge, le genre, l'expérience aux jeux vidéo) sont souvent utilisés comme variables explicatives mais ne semblent pas (ou peu) faire l'objet d'études pour comprendre comment ces variables influencent le sentiment de présence.

#### 4.1.4.3 Méthodes de mesure de la présence

Dans la section précédente, il a été mis en exergue que l'apparition du sentiment de présence et le maintien de ce sentiment est soumis à différents déterminants liés non seulement aux caractéristiques

technologiques du média mais aussi à celles ne relevant pas de la technologie. Afin de mieux comprendre le concept de présence, il est également important d'appréhender la manière dont ce concept se mesure. Comme le concept de présence a été abordé par différentes approches théoriques, différentes mesures de présence ont été développées. Un panorama de ces différentes mesures où l'on distingue deux principaux types, les mesures subjectives et les mesures objectives, est donné dans les sections qui suivent.

#### 4.1.4.3.1 Mesures subjectives du sentiment de présence : les questionnaires

Les questionnaires demeurent la forme d'évaluation la plus couramment employée pour évaluer le sentiment de présence. Ils ont en effet l'avantage de ne pas interrompre l'expérience de l'utilisateur dans l'environnement virtuel ; ils sont également très commodes d'emploi et peuvent interroger plusieurs facteurs ou concepts [IJsselsteijn et al., 2000; Nichols et al., 2000]. Les positions ontologiques étant différentes selon les auteurs, plusieurs questionnaires ont été conçus, tels que le questionnaire de Présence de Witmer et Singer [1998], le SUS de Slater et al. [1994a], l'ITC-SOPI de Lessiter et al. [2001], le MECSPQ de Vorderer et al. [2004], le TPI de Lombard et al. [2009], l'IPQ de Schubert et al. [2001], ou encore le questionnaire de Kim et Biocca [1997], de Hendrix et Barfield [1996a] ou le récent questionnaire de Bouvier [2009]. Une brève description des questionnaires les plus couramment utilisés dans le domaine est proposée ci-dessous (voir van Baren et IJsselsteijn, 2004; Youngblut, 2003 pour une revue détaillée).

**Presence Questionnaire PQ [Witmer et Singer, 1998]** Le Presence Questionnaire constitue un des questionnaires les plus largement utilisés [Youngblut, 2003]. Witmer et Singer [1998] se sont appuyés en partie sur les travaux de Sheridan [1992] et Held et Durlach [1992] pour le mettre au point. Ce questionnaire contient 32 items évalués à partir d'une échelle de Likert à sept points. Il mesure le sentiment de présence au travers de trois sous-échelles mises en évidence par une analyse cluster (analyse de partitionnement de données) : (i) *engagement/contrôle* se réfère au contrôle perçu des événements dans l'environnement, à la réactivité de l'environnement virtuel aux actions initiées par l'utilisateur et à l'engagement de l'utilisateur induit par l'environnement virtuel ; (ii) *naturel* se réfère au degré auquel les interactions et les mouvements du participant lui sont perçus comme naturels et aussi au degré auquel l'environnement est perçu comme conforme à la réalité ; (iii) *qualité de l'interface* se réfère à la distraction et aux interférences provoquées par les dispositifs avec la performance de la tâche. Plus récemment, Witmer et al. [2005] ont entrepris une seconde version de ce questionnaire en reprenant 24 des 32 items du précédent questionnaire qui détenaient les plus hauts facteurs de corrélation et ont ajouté 8 nouveaux items. Cette nouvelle version a été soumise à 325 personnes ; après une analyse factorielle un nouveau facteur ou sous-échelle est apparu : *Adaptation/Immersion* qui se réfère à la vitesse et facilité d'adaptation des individus à l'environnement virtuel. La fiabilité<sup>2</sup> de ce questionnaire a été vérifiée [Stanney et al., 1998b]. Comme le suggère Nunez [2003, p. 131], en raison d'items très spécifiques, ce questionnaire est essentiellement destiné à évaluer le sentiment de présence ressenti dans des environnements immersifs ou semi-immersifs mais il n'est pas adapté aux environnements non-immersifs comme les environnements textuels.

Cependant, leur approche pour mesurer le sentiment de présence est en proie à un faisceau de critiques, principalement par Slater [1999]. Au-delà des considérations théoriques divergentes entre Wit-

2. Fiabilité : elle nous renseigne sur la stabilité et crédibilité du test. Elle peut être estimée par (i) *la consistance interne* qui indique à quel point les items d'un test mesurent la même dimension et sont donc homogènes (mesure réalisée par un Alpha de Cronbach pouvant varier entre 0 et 1) ; (ii) *la fidélité test-retest* qui indique la stabilité du construit évaluée par le test (répétition dans le temps des scores obtenus au test).

mer et Singer [1998] et Slater [1999] à propos de la distinction entre immersion et présence, Slater [1999] note que le questionnaire de Witmer et Singer semble également confondre les caractéristiques individuelles et les propriétés de l'environnement virtuel sans aucun moyen de les séparer. Ce questionnaire ne semble pas non plus donner une mesure du sentiment de présence qui serait construit indépendamment des facteurs qui peuvent l'influencer puisque l'ensemble des questions sont relatives à des déterminants dont Witmer et Singer laissent suggérer qu'ils contribuent au sentiment de présence. On peut également remarquer que Slater [1999] émet une importante critique concernant le calcul des corrélations réalisées (corrélation entre chaque item du questionnaire et le total) pour valider ce questionnaire qui semble en réalité 'faussées' (car on attend de la somme d'une série d'observations qu'elle soit corrélée avec les observations elles-mêmes ; voir Slater, 1999, pour plus de détails). En conclusion, selon Slater [1999] le questionnaire de présence développé par Witmer et Singer [1998] ne permet pas de mesurer le sentiment de présence mais constitue plutôt à leurs yeux une mesure des réponses des individus à différents aspects d'un système (environnement virtuel) donnant ainsi un aperçu de la nature de l'expérience avec l'environnement virtuel. Selon cette vision, cette mesure 'des réponses' peut probablement être corrélée avec d'autres mesures de la présence. Alors que Witmer et Singer [1998] détiennent une approche indirecte en posant des questions relatives à des facteurs qu'ils supposent contribuer au sentiment de présence ou du moins influencer sur celui-ci, Slater et al. [1994a] utilisent une approche opposée en posant des questions directes pour la plupart relative au niveau de présence ressenti par les utilisateurs. Cette approche est détaillée ci-dessous.

**Slater Usoh Steed SUS questionnaire [Slater et al., 1994a]** Ce questionnaire, avec le PQ de Witmer et Singer [1998] constitue l'un des questionnaires les plus largement utilisés : ils le sont dans une trentaine d'études chacun [Youngblut, 2003]. Le questionnaire SUS a été développé à partir de plusieurs études [Slater et Usoh, 1994; Slater et al., 1994a,b, 1995a,b, 1998]. Le questionnaire SUS mesure le sentiment de présence au travers de trois [Slater et Usoh, 1994; Slater et al., 1994a, 1996] à six questions directes [Slater et al., 1995a, 1998] évaluées sur une échelle de Likert à 7 points, constituant toutes des variations autour de ces trois thèmes : (i) le sentiment des participants d'« être là » ; (ii) le degré auquel l'environnement virtuel devient plus 'réel ou présent' que la réalité de tous les jours ; (iii) le degré auquel l'environnement virtuel est ressenti plus comme un 'endroit' qui a été visité que comme des images vues. Bien que ce questionnaire n'ait pas été évalué par ses créateurs, Nunez [2003, p. 110] fournissent à partir d'un échantillon de 101 personnes une mesure de fiabilité raisonnable<sup>3</sup> (alpha de Cronbach de 0,77). Afin de déterminer l'efficacité de ce questionnaire, Usoh et al. [2000] ont mené une étude évaluant si différents questionnaires de présence - le questionnaire SUS et le PQ de Witmer et Singer [1998] - peuvent discriminer les expériences réelles et virtuelles. Leur postulat est que pour être efficaces les questionnaires doivent être capable de passer le 'test de réalité' : le score de présence devrait être plus élevé pour des expériences réelles que pour celles virtuelles. Les auteurs soumettent ainsi les deux questionnaires (dans un ordre randomisé) à un groupe de sujets (n=10) en situation d'environnement réel et à un autre groupe de sujets (n=10) qui eux voient un environnement virtuel immersif simulant le même environnement. Leurs résultats indiquent que les deux questionnaires échouent aux 'tests de réalité' : les scores obtenus par les deux questionnaires n'indiquant pas de différences entre les deux environnements réels et virtuels. Toutefois, le questionnaire SUS décrit des scores de présence qui tendent à être plus élevés pour l'environnement réel comparé à celui virtuel. La conclusion de ces auteurs est que « l'utilisation de ces questionnaires est mise en doute pour comparer les expériences au travers de

3. Il est généralement admis que la fiabilité est acquise lorsque l'alpha de Cronbach est  $\alpha > 0,80$  [Youngblut, 2003]. Toutefois, dans le cadre d'études exploratoires, un  $\alpha > 0,60$  est toléré [Bouvier, 2009].

différents environnements, tels qu'un environnement immersif comparé à un environnement réel, ou encore un environnement d'écran d'ordinateur comparé à un environnement hautement immersif » [Usoh et al., 2000, p. 1]. Les auteurs estiment que ces questionnaires peuvent être utiles seulement lorsque les participants expérimentent le même type d'environnement immersif, alors des variations du niveau de présence peuvent exister avec d'autres facteurs comme les techniques d'interaction.

Par ailleurs, le calcul du score avec le questionnaire SUS - calcul du nombre d'items qui ont des réponses 'élevées' ( $\geq 6$  sur une échelle de Likert à 7 point) - ne requière pas l'utilisation de statistique non paramétrique (car échelle ordinale) [Youngblut, 2003]. Slater et ses collègues traitent alors ce score global comme une distribution binomiale et utilisent des régressions logistiques [Khanna et al., 2006; Slater et al., 1994a, 1998; Slater et Steed, 2000]. Cette manière de calculer le score souligne la conception binaire de la présence soutenue par les auteurs (Slater et ses collègues) : le participant est soit présent dans l'environnement virtuel soit présent dans l'environnement physique, mais il ne peut pas se situer entre les deux. Toutefois, cette technique de calcul du score ne permet pas de contrôler les individus qui ont un biais vers l'attribution de scores élevés quelque soit leur expérience, c'est pourquoi d'autres auteurs privilégient une méthode de calcul plus classique en considérant le score d'un participant comme la somme de ses réponses aux 6 items [Nunez, 2003, 2007].

Ce questionnaire présente en plus de l'avantage d'être très facile et rapide à soumettre, celui de se soustraire aux déterminants de la présence pour évaluer celle-ci. Cependant, il présente aussi quelques limites. En effet, une des limites principales de ce questionnaire est liée au fait que la signification du sentiment de présence est difficile à communiquer aux participants car le concept de présence est obscur lui-même. Les participants ont tendance à répondre selon leur propre interprétation, leur propre concept de présence pouvant être non lié à celui que les auteurs cherchent à mesurer.

**Independent Television Commission's Sense of Presence Inventory : ITC-SOPI [Lessiter et al., 2001]** Lessiter et al. [2001] ont élaboré ce questionnaire afin d'obtenir une mesure applicable à différents médias (télévision, cinéma et environnements virtuels immersifs). Ce questionnaire inclut 44 items mesurés à partir d'une échelle de Likert à 5 points, recoupant 4 sous-échelles : (i) *la présence spatiale ressentie* ; (ii) *l'engagement* ; (iii) *la validité écologique* ; (iv) *les effets négatifs* (réactions physiologiques nuisibles). C'est le premier questionnaire qui fait apparaître des items relatifs aux effets négatifs pouvant être éprouvés à la suite d'une exposition à un média. Les quatre facteurs étant indépendants, et donc un score global de présence ne pouvant être calculé ; Lessiter et al. [2001] suggèrent d'analyser chaque sous-échelle de manière séparée. L'ITC-SOPI permet donc d'obtenir quatre scores acceptables (consistance interne vérifiée par Lessiter et al., 2001) mesurant différents aspects de l'expérience. L'échelle ITC-SOPI a été utilisée par différentes études dont certaines montrent qu'elle est effectivement sensible aussi bien aux manipulations de l'immersion [Dillon et al., 2001; Lessiter et al., 2001] qu'à celles du contenu du média [Dillon et al., 2001].

**Le Igroup Presence Questionnaire - IPQ [Schubert et al., 2001]** Schubert et al. [2001] ont construit leur questionnaire en combinant plusieurs échelles de mesure récemment publiées comme celle de Witmer et Singer [1998] ou encore celles de Slater et al. [1994a] et en ajoutant quelques questions nouvelles. Ce questionnaire, contenant 14 items, présente trois sous-échelles : (i) *la présence spatiale* ; (ii) *l'engagement mesuré* ; (iii) *le jugement du réalisme de l'environnement virtuel*. Ce questionnaire est très complet et peut être considéré comme une synthèse des précédents questionnaires. La consistance interne de ce questionnaire a été vérifiée au cours de plusieurs études [Riecke et al., 2005a; Schubert et al., 2001].

**Temple Presence Inventory Questionnaire - TPI** ([Lombard et al., 2000, 2009, 2011]) Ce questionnaire a été élaboré sur plusieurs années à partir de différentes études en vue de développer une mesure de la présence standardisée, valide à travers différents média. Une version préliminaire de ce questionnaire a été présentée dans l'article de Lombard et al. [2000]. Ce questionnaire se distingue ainsi des précédents questionnaires présentés car il permet d'évaluer également le niveau de présence sociale en plus du niveau de présence physique. La dernière version de ce questionnaire de présence présente 42 items recouvrant au total huit sous-échelles mises en évidence : (i) *la présence spatiale* ; (ii) *la présence-acteur social* ; (iii) *la présence sociale passive* ; (iv) *la présence sociale active* ; (v) *la présence comme engagement* ; (vi) *la présence comme richesse sociale* mesuré sur une échelle bipolaire ; (vii) *la présence comme réalisme social* ; (viii) *la présence comme réalisme perceptif*. Lombard et ses collègues précisent que cette structure à 8 facteurs présente l'avantage de permettre aux chercheurs de mesurer seulement les dimensions de la présence qui sont liées à leur recherche. La consistance interne du questionnaire a été vérifiée au travers de différentes études préliminaires menées par Lombard et al. [2009, 2011].

#### 4.1.4.3.2 Mesures objectives du sentiment de présence

Malgré leurs limites, les mesures subjectives de la présence ressentie demeurent essentielles pour collecter des données sur l'opinion personnelle de l'utilisateur. Toutefois, au vu des limites et avantages des mesures subjectives, de nombreux auteurs suggèrent le recours à de multiples mesures pour estimer le niveau de présence [Freeman et al., 2000; IJsselsteijn et al., 2000; Slater et al., 2009]. Par conséquent, de nombreuses études ont cherché à identifier des marqueurs objectifs, **comportementaux** ou **physiologiques**, évaluant la présence. Une synthèse de l'ensemble des mesures objectives utilisées a été consignée dans deux ouvrages différents [van Baren et IJsselsteijn, 2004; Youngblut et Huie, 2003].

**Les mesures comportementales** Selon Usoh et al. [1996] et Slater [2002], un individu ressentant un fort sentiment devrait adopter un comportement dans l'environnement virtuel similaire à celui qu'il adopterait dans des circonstances similaires de la vie (réalité) de tous les jours. Dans cette optique, Freeman et al. [2000] proposent une méthode alternative aux mesures subjectives pour mesurer la présence ressentie : l'approche comportementale (*behavioralism approach*), fondée sur le principe qu'un individu ressentant un sentiment de présence de par son exposition à un environnement virtuel répondra aux stimuli de l'environnement comme ils le feraient aux stimuli présents dans le monde réel. A partir de ce paradigme, Freeman et al. [2000] se sont attachés à déterminer si les ajustements posturaux des individus permettraient de rendre compte du sentiment de présence ressenti. Toutefois, les résultats obtenus par Freeman et al. [2000], bien qu'indiquant à la fois un effet positif de la présentation stéréoscopique sur l'amplitude des réponses posturales latérales des participants et sur le sentiment de présence ressenti (estimé par des échelles visuelles analogiques), ne permettent pas de considérer les mesures posturales comme un substitut direct aux évaluations subjectives de présence puisque les deux mesures ne semblent pas être corrélées. D'autres marqueurs objectifs potentiels de la présence ressentie ont été suggérés ces dernières années, tels que la vection, proposée par Prothero et Hoffman [1995]; Prothero et al. [1995] et Ohmi [1998], les réponses réflexes verbales et physiques testées par Nichols et al. [2000], une affordance particulière<sup>4</sup> suggérée par Lepecq et al. [2009] ou encore la perception de la vitesse présentée par Wallis et al. [2007].

4. Une affordance particulière est une possibilité d'action perçue qui est à la fois fournie par l'environnement et permise par les capacités de l'individu (e.g., rotation des épaules face à une ouverture virtuelle restreinte; Lepecq et al., 2009).

**Les mesures physiologiques** En parallèle aux indicateurs comportementaux présentés ci-dessus, différentes mesures physiologiques telles que la fréquence cardiaque [Meehan et al., 2001, 2002; Wiederhold et al., 2001], les mesures d'activité électrodermale [Brogni et al., 2003; Meehan et al., 2001, 2002; Slater et al., 2003, 2009; Wiederhold et al., 2001], ou les réponses corticales à un événement virtuel [Baumgartner et al., 2006] ont également été suggérées comme des marqueurs potentiels objectifs de la présence ressentie au cours du temps. De plus en plus d'auteurs se tournent vers ces mesures pour évaluer la présence. Plusieurs études [Meehan et al., 2001, 2002; Slater et al., 2009] ont par ailleurs identifié des relations entre ces deux outils (mesures subjectives et physiologiques).

## 4.2 Critique des concepts : Sur quels concepts s'appuyer ?

La littérature évoquée montre que la notion de réalisme n'est pas un concept unitaire et qu'il n'existe pas de consensus autour de sa définition. Burkhardt et al. [2003] suggèrent ainsi de remplacer la notion de réalisme par les niveaux de fidélité pertinents. Toutefois, l'usage du terme fidélité est très souvent confondu dans la littérature avec celui de validité. On constate parfois une utilisation de ces deux termes de manière interchangeable (e.g., Morice et al., 2008). Cet état de l'art met également en exergue une similitude des définitions des sous-dimensions relatives aux concepts de fidélité et de validité. En effet, bien que la terminologie des sous-dimensions (e.g., fidélité de l'action et validité éthologique) peut parfois différer entre les deux concepts, les phénomènes décrits par ces sous-dimensions sont en tout point identiques (e.g., la fidélité de l'action se définit par les relations entre la performance sur simulateur et en réel alors que la validité éthologique se définit par l'analogie des comportements observés sur simulateur et en réel). De même, les mesures de leur évaluation sont similaires (e.g., mesures de la performance sur simulateur et en réel pour l'évaluation de la fidélité de l'action et la validité éthologique).

Enfin, la profusion des sous-dimensions propres à chacun des concepts (fidélité et validité) rencontrée dans la littérature est susceptible d'être une source de confusion en raison de l'utilisation de terminologies différentes pour décrire les mêmes phénomènes (e.g., fidélité de l'action ou fidélité psychologique, ou encore fidélité fonctionnelle). On constate également un recours à des terminologies identiques pour décrire des phénomènes différents (e.g., la signification de la fidélité fonctionnelle définie par Moroney et Moroney, 1998 diffère de celle spécifiée par Stanton, 1996 ou Liu et al., 2009b). Ce constat semble être toutefois moins avéré pour le concept de validité.

Un point commun à ces différentes conceptualisations de la validité est la référence faite à la situation réelle. Il apparaît que l'évaluation de la validité de l'environnement virtuel (hormis validité/fidélité physique) implique la comparaison de résultats obtenus à partir d'études menées en situation réelle et en environnement virtuel. Toutefois, cette comparaison est coûteuse (en instrumentation) et complexe (contrôle rigoureux de l'ensemble des événements pouvant survenir en situation réelle). Ainsi, les conditions de passation entre les participants et entre les deux situations ne peuvent être similaires. Probablement pour cette raison, les questions sur la validité des simulateurs restent le plus souvent en suspens [Reimer et al., 2006] et le nombre d'études s'intéressant à cette question de validité reste limité [Godley et al., 2002]. Si, parmi les études investiguant la validité des simulateurs, la majorité d'entre elles a établi une *validité relative* des différents simulateurs évalués (e.g., Bédard et al., 2010; Bella, 2008; de Winter et al., 2009; Godley et al., 2002; Mayhew et al., 2011; McGehee et al., 2000; Reed et Green, 1999; Törnros, 1998; Wang et al., 2010), très peu d'entre elles ont démontré la *validité absolue* (e.g., McGehee et al., 2000; Reed et Green, 1999; Wang et al., 2010; Yan et al., 2008).

Selon Kaptein et al. [1996], la limitation du niveau de validité d'un simulateur semble dépendre essentiellement des informations spécifiques qu'un simulateur fournit. En effet, comme nous avons rarement besoin de l'ensemble des informations sensorielles présentes dans notre environnement pour réaliser certaines tâches spécifiques, il apparaît primordial de retrouver au minimum sur le simulateur l'ensemble des informations sensorielles cruciales pour l'activité ou la tâche à l'étude. La qualité de la reproduction de ces stimulations sensorielles en environnement virtuel définit le niveau de validité physique et d'immersion du système de réalité virtuelle. Cependant, il est couramment admis dans la littérature que la validité physique d'un simulateur dépend principalement du niveau de financement investi dans la conception du simulateur. La validité physique est ainsi présumée plus importante pour les simulateurs dynamiques (comportant une plate-forme de mouvement) que pour les simulateurs statiques [Godley et al., 2002]. C'est pourquoi l'utilisation de plate-forme dynamique de plus en plus complexe est généralement recherchée par les concepteurs de simulateurs (lorsque le niveau d'investissement le permet), sans que leur pertinence ait été démontrée.

Toutefois, aucun simulateur ne peut prétendre atteindre une validité physique complète en raison de la complexité et de la variabilité des stimuli perceptifs délivrés dans le monde réel. En effet, les lois de la physique restreignent considérablement les conditions pour lesquelles une simulation peut reproduire des stimulations perceptives identiques à celles créées par le monde réel. Il est ainsi impossible de reproduire avec exactitude les stimuli perceptifs relatifs aux entrées visuelle, auditive, haptique ou encore aux stimuli inertiels [Stoffregen et al., 2003]. A titre d'illustration, la fidélité du stimulus relative aux entrées inertielles peut être atteinte uniquement pour des mouvements en ligne droite à vitesse constante ; dans les autres conditions de simulation reproduisant un mouvement inertiel de l'utilisateur, les différences sont telles qu'elles spécifient la nature de la simulation [Stoffregen et al., 2003]. La fidélité de stimulus ne peut être ainsi produite que dans un nombre très limité de situations. De plus, les différences de stimuli perceptifs entre la simulation et le monde réel ne peuvent être résolues par l'amélioration de la technologie [Stoffregen et al., 2003]. Par conséquent, la possibilité d'aboutir à une duplication stricte de la réalité semble difficile voire incertaine [Reimer et al., 2006; Stoffregen et al., 2003].

Cependant, selon les besoins précis pour lesquels le simulateur a été développé, un contournement délibéré au niveau de la validité physique peut être entrepris [Kaptein et al., 1996]. Il est d'ailleurs généralement admis que le type de fidélité recherché en simulation doit dépendre essentiellement de la finalité de cette dernière [Kaptein et al., 1996; Stoffregen et al., 2003]. Un simulateur se doit d'être un instrument valide pour étudier une question de recherche spécifique [Kaptein et al., 1996]. La validité d'un simulateur doit donc être appréhendée en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire (recherche, formation, développement de véhicule). Selon l'objectif du simulateur, le type de validité à privilégier sera donc différent. Ainsi, pour les études s'intéressant au comportement de l'utilisateur (e.g., apprentissage de la conduite) un haut degré de validité expérientielle ne semble pas pouvoir être considéré comme suffisant [Stoffregen et al., 2003]. Selon Stoffregen et al. [2003], un haut degré de fidélité de l'action apparaît nécessaire et même essentiel. En revanche, si seul l'aspect subjectif de l'expérience est en jeu, les mesures de fidélité expérientielle, d'après Stoffregen et al. [2003], peuvent être considérées comme suffisantes et appropriées.

Par ailleurs, il apparaît dans la littérature qu'une maximisation de la fidélité du stimulus semble être très recherchée par les concepteurs de simulation afin de favoriser et optimiser la fidélité expérientielle [Burkhardt et al., 2003]. Là encore, Stoffregen et al. [2003] et Kaptein et al. [1996] soulignent qu'une telle relation n'a pas été observée pour l'établissement de la fidélité de l'action. Un haut degré de validité physique (fidélité des stimuli perceptifs) ne semble pas garantir une amélioration de la performance de

l'utilisateur ni un comportement de l'utilisateur similaire à celui qu'il adopterait en environnement réel (fidélité de l'action ou validité éthologique). Néanmoins, et malgré des disparités aux niveaux de la fidélité des stimuli, des transferts d'apprentissage entre environnement simulé et réel sont possibles [Kaptein et al., 1996]. Pour comparaison, un simulateur moins sophistiqué et moins coûteux peut produire des performances équivalentes à un simulateur possédant un plus haut degré de validité physique [Godley et al., 2002; Reed et Green, 1999]. De plus, malgré un haut niveau de fidélité, aucun simulateur à l'heure actuelle n'a pu se soustraire à l'occurrence du mal des simulateurs.

En parallèle, selon Morice et al. [2008], la fidélité subjective (expérientielle ou validité faciale) ne permet également pas de garantir l'établissement de la validité fonctionnelle (terme employé sous le sens de fidélité de l'action ; Stoffregen et al., 2003) d'un environnement virtuel. Les travaux menés par Morice et al. [2008], dans une tâche de rebond de balle virtuelle, montrent effectivement que le comportement de l'utilisateur d'un système de réalité virtuelle est influencé par les caractéristiques du système (ici, le délai entre l'action de frappe et la trajectoire de la balle virtuelle) sans pour autant que le réalisme subjectif le soit. Néanmoins, Morice et al. [2008] suggèrent l'investigation commune de ces deux sous-dimensions (fidélité subjective et fidélité de l'action), qu'ils jugent complémentaires, afin de valider un dispositif de réalité virtuelle d'un point de vue à la fois perceptif mais aussi comportemental.

Enfin, alors que Stoffregen et al. [2003] assimilent le concept de présence à celui de fidélité subjective, nous avons pu constater dans la section précédente que ce concept impliquait de multiples dimensions sous-tendant diverses approches philosophiques. Une critique importante de ce concept est émise par Stoffregen et al. [2003], notamment au niveau d'une confusion entre présence et réalisme. Selon ces auteurs, il est important d'effectuer la distinction entre percevoir le réalisme (*i.e.*, perception de la simulation en tant que telle) et percevoir la réalité (*i.e.*, perception de ce qui est simulé) qui constituent deux percepts différant de manière qualitative. En effet, la perception du réalisme renvoie à la ressemblance de la simulation à ce qui est simulé (système réel), et par conséquent ne peut pas constituer une illusion [Stoffregen et al., 2003]. En revanche, la perception de la réalité en simulation ne peut être qu'erronée puisque l'utilisateur n'est pas par définition dans le système réel et détient la connaissance a priori de ne pas l'être (*e.g.*, participants indemnisés pour leur participation, lecture du formulaire de consentement, lieu de la simulation). Selon Stoffregen et ses collègues [2003, p. 122], la présence définie initialement comme une illusion ne peut, par conséquent, renvoyer qu'à une perception non précise de la réalité ou à « une fausse illusion de perception que la simulation est le simulé (système réel) ». Ceci suggère que le statut de la simulation est évident (c'est une simulation et non la réalité) et implique alors, selon ces auteurs, que le sentiment de présence est un sentiment très rare et non commun. Finalement, ces auteurs suggèrent que les utilisateurs d'environnement virtuel sont plus aptes à percevoir du réalisme que la réalité. Toutefois, ils n'appuient leur rhétorique que sur l'approche technologique de la présence, en la définissant comme une illusion, alors que d'autres approches (*e.g.*, écologique) mettent en exergue l'importance de l'interaction avec l'environnement et la capacité d'agir et de répondre aux stimuli comme s'ils étaient réels. Par ailleurs, depuis quelques années, ce concept de présence apparaît constituer un indicateur clé pour évaluer et qualifier les environnements virtuels [Mestre et Fuchs, 2006].

### **4.3 Validité des environnements virtuels, en particulier des simulateurs de conduite : des résultats empiriques**

La validité des simulateurs de conduite est évaluée dans la littérature selon différentes approches. Suite à l'analyse que nous avons faite de cette littérature, il nous apparaît opportun et novateur d'en

rendre compte au travers de deux approches majeures mises en œuvre dans les travaux de validation : (1) l'approche « élément par élément », par laquelle les études cherchent à déterminer l'impact de différentes caractéristiques sur la validité des simulateurs et ; (2) l'approche « globale », par laquelle les études évaluent la validité des simulateurs en considérant le simulateur comme un tout. Enfin, les travaux évaluant les environnements virtuels à travers le sentiment de présence seront présentés.

### 4.3.1 Le mal du simulateur

En parallèle, et avant de présenter ces différentes approches, le *mal du simulateur* se positionne comme un indicateur de la validité des simulateurs. Le mal du simulateur est une forme du mal des transports dont les symptômes physiologiques sont similaires et peuvent prendre différentes formes, intensités et durées selon les individus : nausées, sueurs froides, fatigue visuelle, vertiges, étourdissements yeux ouverts ou fermés, vomissements, etc. Le mal du simulateur peut être ressenti à la fois durant et après l'exposition et dans certains cas, des effets négatifs comme des désorientations et des flashback visuels peuvent subsister durant plusieurs heures après l'exposition. On peut constater également que la plupart des symptômes inhérents au mal du simulateur sont plutôt d'origine visuelle (vision floue, mal de tête, fatigue visuelle) et impliquent moins de symptômes gastro-intestinaux (nausée, réveil de la zone gastrique, vomissement) comparés à ceux du mal du transport [Johnson, 2005].

L'origine de ce malaise est expliquée dans la littérature par différentes théories (pour une discussion approfondie, voir Johnson, 2005, 2007; Kennedy et Frank, 1985; Kolasinski, 1995; LaViola, 2000) : la théorie du conflit sensoriel, la théorie écologique du contrôle postural et la théorie évolutionnaire du poison. La théorie du conflit sensoriel [Reason et Brand, 1975] est fondée sur une divergence entre les stimulations sensorielles et celles attendues par le conducteur (*e.g.*, conflits visuo-vestibulaire ou canal-otolithique). Cette divergence peut être due à une information sensorielle manquante (*e.g.*, sur simulateurs statiques, lecture d'un livre ou carte à l'arrière d'une voiture) ou à une incohérence entre les stimulations sensorielles (*e.g.*, simulateurs dynamiques). La théorie écologique du contrôle postural est quant à elle fondée sur l'augmentation de l'instabilité posturale du corps et des segments corporels (*i.e.*, dégradation de la stabilité posturale) due à une onde d'interférence provoquée par l'interaction entre les fréquences des oscillations naturelles du corps et celles imposées. Cette théorie prédit l'existence d'instabilités posturales avant l'apparition des premiers symptômes de malaise [Stoffregen et Riccio, 1991; Stoffregen et al., 2000]. Enfin, la théorie évolutionnaire du poison avance, pour expliquer l'apparition des cinétoses, une mauvaise interprétation des informations par le corps qui réagit comme lors de processus d'intoxication [Treisman, 1977].

Par ailleurs, de nombreux facteurs ont été identifiés comme susceptibles de faire apparaître le mal du simulateur. Ces facteurs peuvent être divisés en trois groupes (pour une revue détaillée des facteurs, voir Golding, 2006; Kolasinski, 1995; Pinto, 2007) : les facteurs liés au stimulus (*e.g.*, type de mouvement, délai des stimuli, taille du champ de vision), ceux liés aux caractéristiques des individus (*e.g.*, âge, genre, expérience préalable, prédisposition au mal des transports) et ceux liés à la tâche (*e.g.*, durée d'exposition, niveau de contrôle des participants).

Cependant, malgré la connaissance des possibles facteurs et processus sous-jacents au syndrome du mal du simulateur, identifiés dès les années 1950, tout simulateur reste aujourd'hui susceptible de produire de tels effets aversifs chez ses utilisateurs. A notre connaissance, aucun simulateur à l'heure actuelle n'a pu se soustraire à l'occurrence de ce syndrome. Or, de nombreux auteurs s'accordent à dire que le mal du simulateur peut distraire le conducteur durant l'expérience, lui faire adopter un comportement

artificiel/inadapté et produire un abandon du participant dans certains cas. De plus, comme le notent Pinto et al. [2008], les conducteurs ne sont, de manière générale, pas sensibles au mal des transports en situation réelle alors qu'en situation de conduite simulée, beaucoup d'entre eux sont sujets au mal du simulateur. Pinto et ses collègues [2008] suggèrent qu'un tel constat implique que le simulateur ne reproduit pas (via les stimulations sensorielles) une situation écologique similaire à celle de l'environnement réel, sous-entendant alors que le simulateur est imparfait. Le mal du simulateur est donc susceptible d'entacher la validité du simulateur et affecter l'utilité de la simulation [Casali et Frank, 1986]. Quelques études mettent également en évidence l'existence d'une relation négative entre le mal du simulateur et le sentiment de présence ressenti dans l'environnement virtuel [Nichols et al., 2000; Stanney et al., 2002]. Ce syndrome peut être considéré comme un indicateur d'incohérence sensorielle sur le simulateur en limitant alors sa validité psychologique [Pinto et al., 2008]. Par conséquent, il semble nécessaire de contrôler de manière systématique l'occurrence du mal du simulateur en l'évaluant tout au long du processus de validation du simulateur.

L'évaluation du mal du simulateur n'étant pas spécifique à une étude ou une approche, la survenue de ce phénomène sera précisée le cas échéant pour chacune des approches de la validité qui sont abordées ci-dessous.

### **4.3.2 L'approche élément par élément : les études focalisées sur...**

De nombreuses études ont traité le problème de la validité des simulateurs en s'intéressant à certains paramètres composant les systèmes de restitution visuelle, sonore, ou encore inertielle. Par ces investigations, ces études cherchent à déterminer, pour une finalité ou une tâche précise, la configuration optimale du simulateur de conduite en comparant différents paramètres de restitution. Suit donc un panorama rapide des différentes études recensées s'intéressant à l'impact des caractéristiques technologiques de la simulation sur les comportements et performances des conducteurs et la validité des simulateurs de conduite.

#### **4.3.2.1 ... la restitution visuelle**

Les informations visuelles étant essentielles pour l'activité de conduite, de nombreuses études se sont intéressées aux caractéristiques de l'image (e.g., contraste, résolution, ouverture du champ visuel, contenu de la scène visuelle, couleur) à considérer afin d'optimiser la restitution visuelle des simulateurs selon le type de validité recherché. Rappelons que la technologie existante ne permet pas de reproduire en simulation des stimuli visuels fidèles à ceux présents dans le monde réel [Stoffregen et al., 2003]. Une restitution visuelle employant des systèmes de haute technologie ne peut égaler en qualité notre vision du monde réel. Parmi les facteurs principaux qui ont été considérés dans la littérature pour optimiser la restitution visuelle, l'ouverture du champ visuel (ou taille du champ visuel) constitue l'un des facteurs les plus étudiés. Pour une vision binoculaire sans mouvements des yeux ni de la tête, un individu est capable de voir avec un angle d'approximativement 200 degrés horizontalement et 135 degrés verticalement [Gibson, 1979]. Le champ visuel périphérique est considéré comme particulièrement sensible au mouvement. La stimulation de cette partie de la rétine permet notamment de renforcer la sensation de mouvement propre appelée «vection» [Brandt et al., 1973], d'améliorer la perception de la vitesse [Banton et al., 2005; Pretto et al., 2009; Van Erp et Padmos, 2003] ainsi que la performance des individus dans diverses tâches (e.g., recherche visuelle, jugement de l'orientation spatiale, contrôle de trajectoire en simulateur, manœuvres de freinage).

Différentes études ont également montré l'importance de la résolution de l'image pour la validité des simulateurs. Staplin [1996] a étudié l'effet de la résolution de l'image (de 400 à 3000 lignes) sur le comportement des conducteurs lors d'une tâche de jugement d'intervalle minimal de sécurité. Les participants avaient pour consigne d'estimer le dernier moment possible (et sûr) pour initier un virage à une intersection avec des véhicules venant en sens inverse. Cette tâche était effectuée à la fois en environnement virtuel et sur route. Les résultats de l'étude ont mis en évidence que plus la résolution était élevée, plus le comportement des conducteurs étaient similaire à celui observé en environnement réel (validité éthologique). Des résultats similaires sont constatés par Van Erp et Padmos [2003] dans une tâche de contrôle de freinage. De même, Jamson [2000] observe, sur les deux seuls virages analysés du parcours entrepris par les participants, une bonne correspondance au niveau de la vitesse adoptée par les conducteurs entre les situations simulées et sur route (validité éthologique). En revanche, les mêmes virages parcourus avec une résolution plus basse semble entraîner une dégradation de la validité absolue et relative, et ce même si la taille du champ visuel est augmentée. Rappelons que l'augmentation du champ visuel implique des répercussions sur les caractéristiques d'autres paramètres visuels tels que la résolution spatiale ; par conséquent un compromis dans le choix de ces paramètres doit être entrepris. Jamson [2000] montre que ce compromis semble être dépendant de la tâche poursuivie. A l'inverse des observations présentées précédemment au niveau de la vitesse adoptée par les conducteurs, Jamson [2000, 2001] observe également que la position du véhicule sur la chaussée en situation simulée "large champ visuel / basse résolution" est plus proche de celle observée en environnement réel qu'en situation simulée "faible champ visuel / haute résolution". Par conséquent, la résolution semble moins importante que l'ouverture du champ visuel pour les tâches de contrôle de trajectoire. Ces résultats sont confirmés par des études plus récentes [Ni et al., 2006; Van Erp et Padmos, 2003] dans des tâches d'orientation spatiale en environnement virtuel et de conduite sur simulateur. Toutefois, de nombreuses études ont mis en évidence que de larges champs visuels étaient susceptibles de générer davantage de mal du simulateur, si on les compare à des champs visuels de petites amplitudes [Duh et al., 2002; Kolasinski, 1995; Lin et al., 2002]. Selon l'objectif visé par la simulation, des compromis au niveau du choix de paramètres sont essentiels pour optimiser la validité du simulateur.

#### 4.3.2.2 ... la restitution sonore

Tout d'abord, Evans [1970] a montré en conduite réelle une influence positive du son sur la perception de la vitesse. En simulation de conduite, il est généralement admis que l'environnement sonore joue un rôle important pour le réalisme d'une simulation. Cependant, très peu d'études se sont intéressées à évaluer objectivement l'influence des indices auditifs sur la simulation de conduite. Parmi ces études, des résultats contradictoires émergent. Alors que Davis et Green [1995] n'observent aucune influence significative des indices auditifs sur la vitesse pratiquée ou le contrôle latéral du véhicule, Pinto [2007] met en évidence une amélioration du contrôle longitudinal (comportement de freinage) sur simulateur de conduite en présence de son. Ces études différant par la tâche, conduite à vitesse constante [Davis et Green, 1995] et tâche de freinage avec point d'arrêt spécifié [Pinto, 2007], cette divergence de résultats suggère que l'apport du son dans la conduite sur simulateur semble dépendre de la tâche effectuée.

Récemment, une étude sur l'influence de la présence mais aussi de l'intensité du son sur la performance de conduite et le confort des conducteurs a été menée par Hellier et al. [2011]. Bien que la tâche de conduite étudiée impliquait un jeu de simulation de conduite et non un simulateur, leur étude montre des résultats intéressants pour la simulation de conduite. Ils ont, d'une part, montré que plus l'intensité des indices sonores est faible, plus le confort des conducteurs est dégradé. Leurs résultats indiquent éga-

lement qu'en l'absence de son ou en présence d'un son d'une intensité relativement faible (65 dB), les individus ont tendance à conduire plus vite et effectuer plus d'erreurs de conduite que lorsque l'intensité du son est plus élevée (> 75 dB). Ce résultat fait écho à celui indiqué dans l'étude de Pinto [2007] qui suggère qu'il existe une influence du son sur la perception de la vitesse, ce qui expliquerait pourquoi dans leur étude les conducteurs déclenchent les manœuvres de freinage plus tôt en présence d'indices sonores.

Ozawa et al. [2003] soulignent que deux considérations semblent importantes à prendre en compte lors du design du son pour un environnement virtuel : la première est que le son doit être informatif et permettre aux individus d'imaginer naturellement la scène initiale, et la deuxième considération est que les individus doivent être capables de bien localiser la source du son. De manière générale, il est indiqué dans la littérature qu'un son spatialisé permet de rendre le son plus naturel et d'augmenter la crédibilité (validité expérientielle) de la simulation [Hendrix et Barfield, 1996b]. De même, différentes études rapportent une augmentation de l'intensité de perception de mouvement de soi (vection) avec l'utilisation de la restitution sonore spatialisée [Riecke et al., 2005c; Valjämäe, 2005] en comparaison à une restitution sonore non spatialisée ou réduite.

#### 4.3.2.3 ... la restitution inertielle

De nombreuses études dans le domaine de la simulation montrent l'apport de la restitution inertielle (*e.g.*, accélération du véhicule) pour la fidélité du comportement du conducteur. Cette restitution permettrait de réduire l'écart entre le comportement du conducteur en situation de conduite réelle et son comportement lors d'une situation de conduite sur simulateur dynamique. Les premières études à s'intéresser à l'évaluation du rôle de la restitution inertielle sur simulateur dynamique ont été conduites sur simulateur de vol au début des années 1960. Perry et Naish [1964] ont montré que les pilotes répondaient, dans les situations où des forces externes sont présentes (*e.g.*, comme des rafales latérales), de manière plus précise, plus rapide et avec plus d'autorité, sur un simulateur avec restitution de mouvement et restitution visuelle que sur un simulateur à restitution visuelle uniquement. Rathert et al. [1961] ont quant à eux mis en évidence que la corrélation entre les performances des pilotes sur avion et sur simulateur augmentait avec l'ajout de la restitution de mouvement sur le simulateur. Toutefois, ces auteurs indiquent un intérêt limité de la restitution dynamique dans les situations où l'avion est facile à piloter. De manière générale, les études sur simulateur de vol mettent en évidence que la restitution inertielle sur simulateur affecte positivement les performances des pilotes.

En ce qui concerne les simulateurs dynamiques de conduite automobile, plusieurs travaux montrent également que la restitution inertielle contribue à améliorer la performance de conduite [Alm, 1995; Engström et al., 2005; Greenberg et al., 2003; McLane et Wierville, 1975; Raymond et al., 1999, 2000; Siegler et al., 2001]. Une des premières expériences sur simulateur dynamique, focalisée sur l'évaluation du rôle de la restitution inertielle, a été réalisée par Repa et al. [1982] sur le simulateur VPI de l'Institut Polytechnique de Virginie (Etats-Unis) à 5 ddl (roulis, tangage, lacet, déplacements latéraux et longitudinaux). Les participants étaient répartis en quatre groupes, chacun des groupes conduisant le simulateur avec une des quatre conditions de mouvement suivantes : pas de mouvement, mouvement de roulis seulement, mouvements de roulis et lacet, ou mouvements de roulis, lacet et d'accélération latérale. Cette étude rapporte que les conducteurs stabilisent mieux leur véhicule sur la route lorsque la restitution de mouvement était présente sur plusieurs axes. Alm [1995] ont montré, lors d'une tâche de conduite sur route de campagne avec trafic, que la variabilité de la position latérale diminue lorsque la restitution de mouvement est présente sur le simulateur de conduite automobile VTI (Swedish Road

and Transport Research Institute VTI, Suède) à 3 ddl (roulis, tangage, mouvements transversaux). En revanche, la restitution ou non de mouvement par le simulateur n'implique pas de différences de perception de vitesse propre dans les tâches de conduite.

Plus récemment, Siegler et al. [2001] ont évalué la contribution des stimuli kinesthésiques, produits par une plate-forme mobile, pendant l'exécution de tâches élémentaires de conduite (*i.e.*, freinage, virage en intersection à 90 degrés). Ces évaluations ont été menées sur le simulateur de conduite automobile RENAULT à 6 ddl (roulis, lacet, tangage et déplacements latéraux, longitudinaux, verticaux). Ces auteurs mettent en évidence qu'en situation de freinage, l'amplitude de la décélération est plus réaliste lorsque la restitution de mouvement est présente et suggèrent également que le fait de sentir l'action du freinage permet un meilleur contrôle de la décélération. La restitution de mouvement semblerait avoir une influence sur le contrôle de la dynamique du véhicule. De même, en situation de virage, la restitution de mouvements latéraux sur simulateur dynamique semble influencer positivement le conducteur à la fois sur le contrôle de la trajectoire (prise de virage plus large, moins de sortie de voie) de son véhicule [Greenberg et al., 2003; Siegler et al., 2001] et sur le choix de la vitesse adoptée inconsciemment par les conducteurs lors de conduite sur route sinueuse [Reymond et al., 1999]. En conclusion, la restitution inertielle permettant un meilleur contrôle du véhicule favorise une performance de conduite approchant celle observée en environnement réel.

Cette amélioration du comportement du conducteur peut s'expliquer par une meilleure perception du mouvement propre. En effet, la restitution physique de mouvement, impliquant une stimulation des systèmes vestibulaire et somesthésique (sensibles au mouvement), sur les simulateurs de conduite dynamiques, semble importante pour influencer lavection, favorisant ainsi la crédibilité de la simulation [Wright et al., 2006]. Par exemple, en ce qui concerne le phénomène devection, un stimulus visuel produit unevection dans 60 % des cas alors que ce nombre approche 100 % avec une restitution de mouvements physiques [Groen et Bles, 2004]. En plus d'une meilleure perception du mouvement propre, la restitution inertielle semble réduire l'apparition de conflits sensoriels pouvant être à l'origine de comportements erratiques. En effet, ces conflits sont d'une part susceptibles de provoquer une adaptation du comportement sensori-moteur du conducteur, effet non souhaitable pour établir la validité comportementale d'un simulateur de conduite (impliquant la recherche de réponses de conduite similaires sur simulateur à celles sur route). Ces conflits étant d'autre part à l'origine de l'apparition du phénomène du mal du simulateur [Oman, 1990], des études indiquent que l'utilisation de la restitution inertielle permet d'en limiter la survenue [Curry et al., 2002; Watson, 2000].

Toutefois, il est à noter que la présence de restitution inertielle ne prévient pas assurément de l'occurrence de conflits sensoriels et de leurs effets préjudiciables. Des mouvements physiques qui ne correspondent pas exactement aux mouvements visuels perçus ou attendus par le conducteur peuvent également engendrer des conflits sensoriels, des effets similaires à ceux éprouvés sur simulateur statique sont alors susceptibles d'apparaître.

Ce problème de cohérence entre les différentes informations sensorielles constitue un problème majeur dans la simulation de vol, de conduite automobile et de deux-roues motorisé employant des simulateurs dynamiques. Cette recherche de cohérence entre les différentes informations sensorielles se doit d'être étudiée lors de la mise au point de tout simulateur dynamique afin que la restitution inertielle du simulateur soit correctement effectuée, permettant ainsi de profiter de l'ensemble des intérêts que son utilisation peut procurer. Par conséquent, la maîtrise de ces conflits semble constituer un élément central dans l'évaluation de la validité de la simulation. La section suivante présente les principaux travaux réalisés sur cette recherche de cohérence entre les stimuli perceptifs à des fins de validation des systèmes

de réalité virtuelle.

#### 4.3.2.4 ... la Cohérence des informations vestibulaires et interaction visuo-vestibulaire : filtres washout et tilt-coordination

Pour assurer une 'cohérence' au niveau du rendu des informations de mouvement, le paramétrage de la base mobile exige en premier lieu la prise en compte des problèmes d'échelle de mouvement. Un des moyens utilisé pour obtenir une reproduction aussi fidèle que possible des mouvements inertiels est le pilotage de *stratégies de commande*, appelées également *algorithmes de restitution inertielle* ou *filtres washout*. Les déplacements produits par les plates-formes mobiles sont limités. Par conséquent, une restitution complète à l'échelle 1 des accélérations produites en situation réelle n'est pas possible. Rappelons qu'un facteur d'échelle correspond à la fraction de l'accélération calculée du véhicule réel que le système de mouvement doit reproduire. Par conséquent, un facteur d'échelle inférieur à 1 signifie que les accélérations reproduites en simulation seront inférieures aux accélérations subies dans la réalité. L'objectif principal de ces filtres washout est de transformer la trajectoire générée par le modèle dynamique de véhicule (présenté précédemment au chapitre 3) en commandes aux actionneurs afin de délivrer des trajectoires restreintes réalisables par le simulateur [Barbagli et al., 2001; Elloumi, 2006], dans les limites de déplacement de la base mobile. La particularité de ces filtres est l'utilisation du mouvement de retour vers une position neutre (en dessous des seuils de perception) en vue de la manœuvre suivante [Barbagli et al., 2001; Reid et Nahon, 1985; Wang et Fu, 2004]. Toutefois, le design de filtres washout efficaces constitue un problème complexe [Barbagli et al., 2001]. C'est pourquoi de nombreuses propositions de filtres washout ont été publiées ces vingt dernières années (voir Colombet, 2010, pour une revue détaillée du fonctionnement de ces filtres), e.g., filtres classiques [Reid et Nahon, 1985; Barbagli et al., 2001], filtres adaptatifs [Parrish et al., 1975], filtres optimaux [Elloumi, 2006; Sivan et al., 1982; Telban, 2002], ou encore filtres prédictifs [Dagdelen et al., 2004]. Bien que la majorité de ces propositions a été développée spécifiquement pour la simulation de vol, on retrouve dans la littérature quelques propositions ou adaptations des stratégies de commande pour la simulation de conduite automobile [Elloumi, 2006; Dagdelen et al., 2004] et de deux-roues motorisé [Barbagli et al., 2001].

Pour l'ensemble de ces stratégies de commande, les accélérations continues aussi bien longitudinales que latérales sont restituées par une technique connue sous le nom de « *tilt-coordination* » [Reid et Nahon, 1985]. Cette technique repose sur l'ambiguïté des organes otolithiques qui répondent de manière équivalente à la gravité et à l'accélération linéaire en raison de leur configuration inertielle. Cette technique de simulation consiste ainsi à effectuer une inclinaison très lente du conducteur (ou pilote) sous le seuil de détection des canaux semi-circulaires, ainsi la direction de la gravité par rapport à la tête du conducteur sera orientée dans la même direction que l'orientation de l'accélération gravito-inertielle en situation réelle. Comme une simulation visuelle de l'accélération linéaire est synchronisée avec cette inclinaison du conducteur, le conducteur interprète cette combinaison de mouvement comme une accélération linéaire (mouvement propre) au lieu d'une inclinaison. Cette technique présente néanmoins quelques restrictions. Ainsi, la vitesse angulaire est habituellement fixée autour de  $2-3 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$  [Groen et al., 2000; Groen et Bles, 2004; Reid et Nahon, 1988] afin que l'inclinaison ne soit pas perçue par l'individu. De plus, il est suggéré dans la littérature que l'inclinaison du conducteur ne dépasse pas 25 degrés [Pinto et al., 2008]. Pour une simulation d'accélération longitudinale, une brève accélération longitudinale de la base mobile est couramment réalisée en combinaison de l'inclinaison de la base mobile qui pousse le conducteur sur le dossier de son siège. Il est généralement admis que cette translation doit être effectuée avec une accélération au-dessus du seuil de détection vestibulaire et une décélération sous

le seuil de détection vestibulaire. Ces limites font que la validité pratique de cette technique est encore sujette à débat [Pinto et al., 2008].

Afin de calibrer au mieux les paramètres inhérents au tilt-coordination, quelques études se sont intéressées à déterminer les échelles de mouvement ou gains produisant des sensations d'accélération longitudinales réalistes [Berger et al., 2007; Berger, 2009; Groen et al., 2000; Groen et Bles, 2004]. De façon générale, il semble que d'importantes variations entre les valeurs d'accélération visuelle et inertielle perçues pour différents degrés de liberté (e.g., lacet, roulis) peuvent être tolérées par le système perceptif des individus [Van der Steen, 1998]. Toutefois, alors que certains auteurs suggèrent l'utilisation d'un gain inférieur à 1 pour restituer les accélérations de la base mobile, d'autres estiment qu'un gain égal ou supérieur à 1 doit être privilégié pour permettre une perception réaliste d'accélération linéaires. Pour les études présentées ci-dessous, le gain est défini comme le rapport entre l'accélération renseignée par l'inclinaison de la plate-forme mobile et l'accélération visuelle. Groen et al. [2000] suggèrent l'utilisation de gains fixés à 0,2 au niveau des translations longitudinales de la base mobile et à 0,6 au niveau de l'inclinaison de la base mobile (en tangage), ce afin de permettre une perception d'accélération linéaire jugée réaliste par les individus (recherche de validité expérientielle). Ainsi, une meilleure perception des accélérations longitudinales est produite lorsque l'inclinaison du corps en tangage correspond à 0,6 fois celle de l'accélération visuelle. Par conséquent, il semble que le mouvement de la base mobile est généralement surestimé comparé au mouvement de la scène visuelle. Pour une perception réaliste des accélérations linéaires sur simulateur, une réduction des mouvements physiques semble donc nécessaire. Au contraire, d'autres auteurs suggèrent le recours à des gains supérieurs à l'unité : de 0,7 à 1,8 afin de simuler de façon crédible des accélérations linéaires [Berger et al., 2007; Berger, 2009]. Berger et al. [2007] mettent en évidence que le gain produisant la perception d'accélération linéaire la plus réaliste est de 1,19 au niveau de l'inclinaison de la base mobile, un gain de 1 (signifiant une correspondance physique entre l'accélération visuelle et l'inclinaison de la base mobile) étant perçu par les participants comme presque aussi réaliste et crédible. Ce résultat suggère que les accélérations linéaires simulées sont perçues de façon plus réaliste lorsque le changement de direction du vecteur force gravito-inertiel simulé par l'inclinaison du corps est approximativement consistant (équivalent) à l'accélération visuelle.

En parallèle à ces études centrées sur la technique de tilt-coordination, d'autres études [Brünger-Koch, 2005; Brünger-Koch et al., 2006; Grant et al., 2004; Kuge et al., 2002] ont cherché à déterminer l'impact de différentes calibrations d'un même filtre washout sur le comportement du pilote (ou conducteur) ainsi que sur leurs impressions subjectives. Selon Kemeny [2001], une meilleure connaissance des valeurs de facteur d'échelle acceptables au niveau de la restitution visuelle et inertielle selon les configurations des simulateurs de conduite utilisées est nécessaire.

Enfin, un certain nombre d'études se sont attachées à l'impact de ces stratégies de commande, dans leur globalité, sur le comportement des pilotes et sur la validité subjective de l'expérience (validité expérientielle). Telban et al. [2005] ont comparé l'effet de 3 stratégies de commande (stratégie adaptative, optimale, et non-linéaire) sur la performance des pilotes lors de la réalisation de diverses tâches (e.g., décollage avec ou sans panne de moteur, approche pour l'atterrissage de côté ou en ligne droite). L'étude a été réalisée sur le simulateur VMS (Visual Motion Simulator, NASA). Les résultats de cette étude suggèrent que la stratégie non linéaire produit de façon générale moins de charge mentale et de variations entre les pilotes. Toutefois, l'impact des trois algorithmes sur la performance n'a été observé que sur les pilotes dont le comportement de contrôle du simulateur était erratique. En effet, les pilotes qui contrôlaient le mieux le simulateur ont obtenu des performances similaires pour chacun des trois algorithmes testés. De même, Reid et Nahon [1988] ont comparé l'impact de quatre types de stratégie de commande (stratégie classique, optimale, adaptative, et sans mouvement) sur la performance des pilotes

effectuant une séquence de vol caractéristique des avions de transport commercial (*i.e.*, phase d'atterrissage). L'étude était réalisée sur le simulateur UTIAS (University of Toronto Institute for Aerospace Studies) qui comportait 6 degrés de liberté. Reid et Nahon [1988] ont observé peu d'effet du type de stratégie de commande sur la performance des pilotes, cependant, du point de vue du jugement subjectif (validité expérientielle), les pilotes ont rapporté de manière générale préférer la stratégie de commande adaptative par rapport aux autres stratégies testées.

Plus récemment, pour la simulation de conduite automobile, Colombet et al. [2008] ont comparé l'impact de trois configurations du simulateur CARDS (Comprehensive Automobile Research and Development Simulator, Renault) sur la performance de conduite des conducteurs lors d'une tâche de suivi de véhicule. Les positions, vitesses, accélérations du véhicule conduit par les sujets ont été enregistrées afin d'établir des comparaisons objectives entre les trois configurations suivantes : (i) statique, (ii) dynamique avec un filtre washout classique, et (iii) dynamique avec un filtre washout adaptatif. De plus, à la fin de l'expérience, afin d'évaluer la validité expérientielle des différentes configurations, les participants devaient indiquer si une différence au niveau du retour dynamique du véhicule était perçue entre la session de conduite présente et les précédentes, et indiquer la session de conduite qu'ils jugeaient la plus réaliste. Leurs résultats mettent en évidence que les participants préfèrent de manière générale une configuration dynamique du simulateur, cependant aucune différence entre les deux configurations dynamiques (entre les filtres washout classique et adaptatif) n'a été remarquée par les participants. De plus, l'impact de ces deux stratégies de commande sur la performance de conduite du conducteur n'apparaît pas significatif. Par conséquent, les filtres classiques et adaptatifs semblent générer des perceptions d'accélération « équivalentes » pour les bases mobiles comportant un espace de travail similaire à celui du simulateur CARDS (plate-forme Gough-Stewart selon 6 degrés de liberté). En revanche, Valente Pais et al. [2009] montrent que l'impact et l'utilité des filtres washout semblent dépendre de la tâche de conduite.

#### 4.3.2.5 ... les délais temporels ou les problèmes de cohérence temporelle entre les stimuli

En sus du problème de cohérence spatiale entre les stimuli sensoriels, de nombreuses études ont traité le problème des délais temporels pour la validité, principalement éthologique et expérientielle, des environnements virtuels. Le *temps de réponse* ou *retard* (« *transport delay* ») correspond au temps écoulé entre l'action de l'utilisateur et la restitution des stimuli. On peut distinguer dans la littérature deux types de délais :

- (i) le délai de la restitution visuelle (« *visual display lag / delay* ») qui correspond au temps écoulé entre l'action de l'utilisateur (*e.g.*, mouvement de la tête, mouvement du volant) et la représentation visuelle de cette action par l'interface visuelle ;
- (ii) le délai du système de mouvement (« *motion system delay* ») qui peut se définir comme le laps de temps écoulé entre l'action du conducteur (*e.g.*, mouvement du volant, appui sur le frein) et la réaction mécanique du simulateur.

Bien que ce dernier type de délai soit peu étudié, celui-ci constitue un facteur critique à ne pas négliger. L'origine principale de ce délai peut provenir d'une vitesse de calcul insuffisante mais aussi du temps de réponse des actionneurs mettant en mouvement la plate-forme. Lorsque le délai de réponse est supérieur à celui d'un véhicule réel (environ 100 ms), des difficultés de contrôle de véhicule peuvent apparaître [Frank et al., 1988]. Toutefois, il semble que l'existence d'un délai du système visuel est plus perturbant sur la performance des individus (*e.g.*, contrôle du simulateur) que l'apparition d'un délai du système de mouvement [Frank et al., 1988]. En effet, de nombreuses études mettent en évidence que le délai de la restitution visuelle peut produire des dégradations au niveau perceptif et au niveau

du comportement sensori-moteur de l'individu [Morice et al., 2007; Wildzunas et al., 1996]. Ce délai est également susceptible de produire une perception d'instabilité du monde environnant, phénomène connu sous le terme oscillopsie [Allison et al., 2001]. Des symptômes liés au mal du simulateur ont également été rapportés dans la littérature suite à des temps de réponse de la restitution visuelle longs [Parent, 1998]. C'est pourquoi ce temps de réponse peut être considéré comme un facteur clé pour évaluer la validité expérientielle et éthologique d'un environnement virtuel [Morice et al., 2008].

Quel que soit le type de délai, visuel ou du système de mouvement, différentes études ont mis en évidence que ces délais peuvent avoir un impact négatif au niveau du confort de l'utilisateur et faire survenir le mal du simulateur [Kolasinski, 1995; Parent, 1998; Pinto et al., 2008]. Frank et al. [1988] et Parent [1998] précisent que le mal du simulateur peut survenir dès que le délai est supérieur de 30-40 ms à celui du système réel.

### 4.3.3 L'approche globale : le simulateur est évalué comme un tout

En parallèle des études centrées sur l'évaluation de la validité, élément par élément, des simulateurs de conduite, d'autres études se sont attachées à évaluer les simulateurs de conduite (statiques ou dynamiques) de manière globale. La majorité de ces études s'est concentrée à évaluer la validité éthologique des simulateurs, en distinguant généralement validité relative et validité absolue.

Une des premières études focalisées sur l'évaluation de la validité éthologique d'un simulateur de conduite dans sa globalité a été menée par Blaauw [1982], sur le simulateur statique de l'Institut de Recherche en Facteurs Humains TNO (Pays-Bas). Sur simulateur et sur route, les participants devaient conduire sur une section de route à 4 voies (lignes de trafic blanches présentes). Différentes mesures du contrôle latéral et longitudinal du véhicule ont alors été analysées (position latérale moyenne et écart type, variabilité de l'angle du volant, vitesse moyenne et écart type, position de l'accélérateur moyenne et écart type). De plus, une mesure subjective de la performance a été entreprise au travers de deux questionnaires, un premier portant sur différents aspects de la conduite (difficulté de la tâche, monotonie, attention nécessaire) et le second sur le réalisme de la simulation (comparaison entre la conduite sur simulateur et sur route). Les résultats de cette étude indiquent que les participants maintiennent des vitesses de conduite similaires sur simulateur et sur véhicule instrumenté. En revanche, pour le contrôle latéral du véhicule, des différences sur la position latérale et l'angle du volant ont été trouvées entre la conduite sur simulateur et sur route : sur simulateur, les fréquences de mouvement de volant ainsi que la position latérale moyenne (et son écart type) sont plus importantes sur simulateur que sur véhicule instrumenté. Les mesures subjectives établies par questionnaire ont également permis de différencier de manière significative le simulateur du véhicule instrumenté, que ce soit au niveau du contrôle longitudinal ou latéral. Alors que l'ensemble des avis sont défavorables au simulateur au niveau du contrôle latéral, pour le contrôle longitudinal, les participants jugent le simulateur plus facile à contrôler que le véhicule instrumenté. Par conséquent, cette étude suggère que le simulateur TNO présente une validité relative pour le contrôle latéral étant donné la variabilité de la position latérale beaucoup plus élevée sur simulateur qu'en conduite sur route. D'après ces auteurs, il semblerait que cette performance dégradée sur simulateur comparée à celle sur route est due à une perception diminuée des translations latérales en raison de l'absence d'informations kinesthésiques (simulateur statique). Par contre, selon Blaauw [1982], cette étude permet d'attester de la validité absolue (et relative) du simulateur TNO pour le contrôle longitudinal.

En revanche, des études plus récentes sur le contrôle longitudinal du véhicule (e.g., vitesse propre) ont souvent échoué à établir la validité absolue du simulateur exploré pour ce type de contrôle, que

ce soit sur simulateur statique [Bella, 2008] ou dynamique [Godley et al., 2002; Törnros, 1998]. Bella [2008] a réalisé une analyse comparative entre les vitesses enregistrées sur différents sites (routes à deux-voies) en environnement rural près de Rome et les vitesses pratiquées par les participants sur ces mêmes sites reproduits sur simulateur statique. Cette étude a mis en évidence que la validité absolue du simulateur CRISS (Inter-University Research Center for Road Safety, Italie) n'était pas établie pour l'ensemble des sites investigués (la vitesse pratiquée sur simulateur étant supérieure à celle sur site réel). Une validité relative était en revanche obtenue pour ce simulateur dont la finalité était de constituer un dispositif pour la recherche sur les vitesses pratiquées sur les routes rurales à deux-voies. En suivant un protocole très proche de celui de Bella [2008], Mao et al. [2009] ont également montré que les vitesses pratiquées sur le simulateur WHUT (Université de Technologie de Wuhan, Chine) sont supérieures à celles mesurées sur route. Par conséquent, comme pour le simulateur CRISS, une validité relative du simulateur statique WHUT est établie, ce dernier constituant ainsi une alternative aux études de terrain pour la recherche relative aux vitesses propres des conducteurs [Mao et al., 2009].

L'établissement de la validité absolue pour le contrôle longitudinal du simulateur n'apparaît pas forcément garantie, non plus, par la présence de système de restitution inertielle. Törnros [1998] a évalué la validité éthologique du simulateur dynamique VTI (Suède) comme dispositif pour planifier le design de tunnels routiers. A cette fin, l'expérience consistait en une phase de conduite à l'intérieur d'un tunnel réel (tunnel Ekeberg, Suède) et une phase de conduite à l'intérieur de ce même tunnel reproduit sur le simulateur VTI, la vitesse étant limitée dans les deux environnements à 70 km.h<sup>-1</sup>. Les résultats indiquent que la vitesse moyenne pratiquée est supérieure sur simulateur par rapport à la situation réelle. Par conséquent la validité éthologique absolue n'est pas satisfaisante mais une validité relative est en revanche établie. De même, Godley et al. [2002], en étudiant la vitesse des participants sur des routes de différents sites (approche à un virage à droite, à gauche, ou approche à un panneau stop) contenant ou non des bandes rugueuses, ont mis en évidence que les participants réagissaient à la présence de bandes rugueuses sur la route de manière similaire en environnement réel et simulé. Néanmoins, les participants adoptaient des vitesses de conduite plus rapides sur le simulateur de conduite dynamique MUARC (Monash University Accident Research Center, Australie) que sur le véhicule instrumenté. Par conséquent, comme pour les études citées précédemment, seule une validité éthologique relative a été établie pour le simulateur dynamique MUARC, destiné à être un outil de recherche sur les facteurs humains et en particulier sur l'évaluation de mesures pour contrer les dépassements de vitesse.

Parallèlement à ces études évaluant la validité des simulateurs de conduite par des mesures de contrôle du véhicule, quelques études ont questionné la validité des simulateurs au moyen d'autres indicateurs, reposant sur les différences individuelles [Neimer et Mohellebi, 2009] ou encore la charge mentale (e.g., mesures physiologiques ; Reimer et Mehler, 2011). De même, Underwood et al. [2011] ont récemment cherché à évaluer la validité du simulateur de conduite statique de l'Université de Nottingham au moyen de mesures cognitives de haut niveau comme l'attention du conducteur vis-à-vis des situations dangereuses (e.g., configuration dangereuse de la route ou de ses usagers). A cette fin, Underwood et al. [2011] ont comparé les réponses à la perception du danger sur simulateur de conduite statique, avec celles sur route, et celles obtenues lors d'une participation à un test conventionnel<sup>5</sup> de perception du danger. Dans les trois situations à l'étude (sur route, sur simulateur, test conventionnel), leurs résultats indiquent que les conducteurs expérimentés explorent plus la scène visuelle et présentent des durées de fixation oculaire moins importantes que les jeunes conducteurs. Ces patterns de comporte-

---

5. Lors d'un test conventionnel de perception du danger les participants regardant une séquence vidéo (enregistrée du point de vue d'un conducteur de voiture) doivent appuyer sur un bouton poussoir dès qu'un événement dans la scène nécessiterait une réaction du conducteur (e.g., ralentissement de la voiture devant nous, piéton s'apprêtant à traverser, etc.).

ments avec des différences similaires entre les groupes de sujets pour les trois environnements suggèrent l'établissement d'une validité relative du simulateur de l'Université de Nottingham [Underwood et al., 2011]. La validité absolue ne peut en revanche pas être établie en raison de l'impossibilité de créer des situations de danger sur simulateur similaires à celles qui peuvent être rencontrées en situation réelle [Underwood et al., 2011].

Enfin, on peut s'apercevoir au travers de ces différentes études que le mal du simulateur n'est à l'heure actuelle pas systématiquement évalué. En effet, la majorité des études ne précise pas l'utilisation d'échelles d'évaluation du mal du simulateur ni sa survenue au sein des participants (e.g., Godley et al., 2002; McGehee et al., 2000; Underwood et al., 2011; Yan et al., 2008). Alors que Törnros [1998] abandonne certains mouvements inertiels à la suite de symptômes de mal du simulateur rapportés par certains participants, Neimer et Mohellebi [2009] éliminent dès la session d'entraînement les participants souffrant de mal du simulateur. Toutefois, la méthodologie adoptée par Neimer et Mohellebi [2009] peut poser problème puisque le mal du simulateur fournit une indication de la validité du simulateur testé. Seules les études de Blaauw [1982] et Bella [2008] questionnent leurs participants sur la survenue de symptômes d'inconfort liés au mal du simulateur. Aucun mal du simulateur n'est rapporté au niveau de ces deux études.

#### **4.3.4 Le sentiment de présence : une approche alternative pour évaluer la validité**

Alors que la majorité des travaux de recherche traitant du sentiment de présence ont cherché à déterminer les facteurs potentiels (causes) de son émergence, un nombre très limité d'études s'est intéressé à ce concept comme un outil pour évaluer les environnements virtuels et plus spécifiquement les simulateurs de conduite. Tichon et al. [2006] et Tichon [2007] ont étudié le niveau de présence ressenti par des conducteurs de trains en simulation de conduite et l'impact des différents facteurs de la présence dans le but d'améliorer le simulateur de conduite de train de l'Université de Queensland (Australie). Ce simulateur a pour finalité l'entraînement des conducteurs aux prises de décision en condition de stress. Dans ces études, différents événements constituant des situations potentielles de stress en environnement réel sont reproduits sur le simulateur de conduite. Ces différents événements pouvaient être complexifiés en augmentant la charge mentale du conducteur par des modifications des conditions opérationnelles (e.g., courbure de la voie). Le sentiment de présence a été mesuré à partir de deux questionnaires : le Presence Questionnaire (PQ) de Witmer et Singer [1998], permettant d'obtenir des mesures de quatre facteurs de la présence, et le Igroup Presence Questionnaire (IPQ) de Schubert et al. [2001] mesurant la présence spatiale de façon introspective.

Les résultats de ces études indiquent que parmi les quatre facteurs de présence examinés au travers du PQ, le facteur adaptation/immersion est celui qui a été le mieux évalué (plus haut score), suggérant que les participants se sont adaptés relativement facilement au simulateur. En revanche, le facteur engagement est celui qui a reçu le score le plus faible. Les auteurs interprètent ce résultat par le fait que les participants n'aient pas eu le sentiment que le simulateur était aussi réel qu'un train, et ce principalement en raison de l'absence de restitution inertielle sur le simulateur. Cette différence entre les deux dispositifs (simulateur et train) nécessite donc d'être réduite à un niveau qui favorise la présence au lieu de la dégrader [Tichon, 2007]. En comparaison au score général de présence obtenu au PQ, celui obtenu au questionnaire IPQ est moins élevé. Par conséquent, bien que les impressions des conducteurs sur les facteurs de présence soient globalement positives, leur jugement sur le degré de présence ressenti dans

l'environnement virtuel n'était pas aussi significatif. Selon Tichon et ses collaborateurs, l'amélioration de certains paramètres pointés par les mesures des facteurs de présence (mesurés par le PQ) semble nécessaire afin d'augmenter le sentiment de présence ressenti (mesuré par l'IPQ), d'autant que les jugements subjectifs des individus sont particulièrement importants vis-à-vis de la finalité du simulateur étudié (entraînement en condition de stress).

Très récemment, Johnson et al. [2011] ont également étudié la question de la validité des simulateurs en s'intéressant au sentiment de présence induit par ces derniers. Dans une première étude, les participants étaient confrontés à trois événements « surprises » simulés sur un simulateur statique, *i.e.*, une voiture déboîtant subitement de la bande d'arrêt d'urgence, ou encore un feu vert passant subitement à l'orange à l'approche de l'intersection. Les participants étaient alors forcés d'y réagir en effectuant soit une manœuvre d'évitement, soit un freinage d'urgence. Les résultats de cette étude montrent une élévation significative de la fréquence cardiaque en réponse aux événements « surprenants » simulés. Selon les auteurs, ce résultat suggère que le simulateur est donc capable de générer un sentiment de présence chez les participants. Dans une seconde étude, Johnson et al. [2011] ont comparé les réactions physiologiques (fréquence cardiaque, consommation d'oxygène et ventilation) des conducteurs entre une session de conduite sur simulateur statique et sur route (les participants conduisant leur propre véhicule). Les résultats ont indiqué que l'évolution des variables physiologiques entre l'état de repos et la conduite est similaire entre celle effectuée sur simulateur et sur route, ceci suggérant une bonne reproduction de l'expérience réelle de conduite. De plus, une forte corrélation ( $r = 0,90$ ) entre la conduite sur simulateur et sur route est observée pour les valeurs de ventilation moyenne. En revanche, la fréquence cardiaque moyenne des participants était plus élevée lorsqu'ils conduisaient en environnement réel qu'en situation simulée, ce résultat pouvant être expliqué selon les auteurs par un stress physiologique plus important associé à la conduite sur route. Pour conclure, Johnson et al. [2011] suggèrent, au vu de l'ensemble des résultats, que le niveau d'immersion du simulateur statique investigué est suffisant pour produire un sentiment de présence, et établir une validité relative et même absolue pour certains paramètres physiologiques (ventilation). Johnson et al. [2011] soulignent enfin que la connaissance actuelle du niveau d'immersion nécessaire pour produire le sentiment de présence désiré durant une simulation de conduite, demeure très limitée. Des études supplémentaires sont nécessaires pour en obtenir une meilleure compréhension.

Pour conclure, aucune de ces études [Johnson et al., 2011; Tichon et al., 2006; Tichon, 2007] n'a tenté d'évaluer le mal du simulateur malgré, rappelons-le, ces effets négatifs fréquents et sévères. Toutefois, une étude [Tichon et al., 2006] rapporte qu'un participant a souffert du mal du simulateur.

## 4.4 La validation des simulateurs moto

Essentiellement en raison de l'intérêt récent porté à la simulation moto, très peu d'études ont aujourd'hui abordé le problème de la validité de ces simulateurs. A notre connaissance, seuls cinq études ont effectué des travaux de validation de simulateurs moto. Parmi ces études, différents types de validité et fidélité ont été étudiées et selon différentes approches (approche élément par élément et/ou globale). Toutefois, l'approche élément par élément semble privilégiée par la majorité de ces études. 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 et Tagami, 2002; Stedmon et al., 2009]. Tout d'abord, les études reposant uniquement sur des analyses subjectives seront présentées. Puis, les études combinant les deux types d'analyses seront abordées, selon le type de validité ou fidélité investigué. Pour chacune d'elles, l'approche privilégiée sera précisée.

Axés 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 angles de rotation sur le niveau de validité expérientielle du simulateur Honda (prototype 2), pour les mouvements de roulis et tangage. Le simulateur Honda a pour finalité la formation à la conduite axée sur la gestion des situations à risque. 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 à 0 mm, à une hauteur de 150, 300 et 500 mm au-dessus). Pour le centre de rotation du tangage dont la hauteur était fixée à 300 mm, la distance entre le centre de rotation et les hanches du participant a été manipulée (entre 200 à 500 mm 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<sup>-1</sup> - et vitesses moyennes et élevées, allant de 25 à plus de 60 km.h<sup>-1</sup>). Les participants ont évalué ces différentes positions au moyen d'échelles à 5 points questionnant le sentiment de stabilité et de contrôle directionnel. Leurs résultats ont indiqué qu'un positionnement du centre de roulis à 250 mm au-dessus du niveau de la route et du centre de tangage à 400 mm devant l'assise du conducteur permettait de générer une sensation de conduite similaire à celle d'une vraie moto. De manière similaire, les auteurs ont étudié l'amplitude de l'angle de roulis. Les valeurs de roulis testées variaient entre 0 et 15 degrés (aucune précision supplémentaire n'est fournie). Les résultats ont indiqué que l'évaluation relative à la sensation d'inclinaison était meilleure avec l'augmentation de l'angle de roulis jusqu'à un angle de 12 degrés alors que pour l'évaluation de la facilité à contrôler la direction, le pattern opposé est mis en évidence. En effet, les participants jugeaient le contrôle de moins en moins facile avec l'augmentation de l'angle de roulis. De plus, leurs résultats ont également montré que le score associé aux angles de roulis testés dépendait de la vitesse linéaire pratiquée par le conducteur, que ce soit pour l'évaluation de la sensation d'inclinaison ou celle de 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] concluent que, sur le simulateur Honda, l'angle de roulis doit être limité à 11 degrés pour les vitesses faibles (en deçà de 25 km.h<sup>-1</sup>) et 7 degrés pour les vitesses moyennes et élevées (supérieures à 25 km.h<sup>-1</sup>). 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<sup>-1</sup> 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 en roulis de l'image) et au niveau de la plate-forme dynamique permettant de reproduire une sensation d'inclinaison du véhicule. En variant les facteurs d'échelle durant une tâche de conduite simulée, les auteurs ont demandé aux participants (n=4) de 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 4.2).



FIGURE 4.2 – Représentation schématique du parcours utilisé par Kageyama et Tagami [2002]. Extrait de Kageyama et Tagami [2002]

Considérant que le participant était complètement familiarisé aux cinq derniers tours, les auteurs ont comparé l'écart entre la trajectoire cible (générée sur la base des cinq 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 1<sup>er</sup> et le 3<sup>ème</sup> tour et une stabilisation au-delà de ce tour. Une fois le participant familiarisé, les auteurs ont mesuré sa fréquence cardiaque sur le même parcours. Les résultats ont indiqué une variation de cette fréquence en fonction des exigences de contrôle imposées 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'une extrapolation des résultats à une population plus générale : des investigations complémentaires semblent nécessaires. Comme Reimer et Mehler [2011], Kageyama et Tagami [2002] utilisent une série de mesures physiologiques afin d'évaluer la validité du simulateur testé. Toutefois, alors que la première étude établit une comparaison avec des résultats obtenus sur route (validité éthologique), la seconde étude cherche à se soustraire à cette comparaison par l'utilisation de ces mesures physiologiques, supposées retranscrire les réactions vitales du conducteur.

Cossalter et al. [2010, 2011] ont procédé à l'évaluation du simulateur DIGEM (voir section 3.3.5 pour une description du simulateur) à travers deux étapes complémentaires. Cossalter et ses collaborateurs [2010] 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. Concernant l'évaluation de

la validité du simulateur, la première évaluation, dite objective, consistait à comparer le comportement produit sur simulateur et sur véhicule réel (validité éthologique), tandis que la seconde évaluation, dite subjective, reposait sur le jugement des différentes caractéristiques (visuelle, auditive, inertielle) du simulateur. 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. L'évaluation subjective a, quant à elle, été réalisée à partir de 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 visuels 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.

Estimant 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. [2009] se sont naturellement tournés vers l'évaluation de ces deux types de fidélité. Le simulateur 'Motorcycle-Sim' 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 analysées. 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). Leur étude a 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. En revanche, bien que la plupart des participants préférait le mode braquage combiné à une inclinaison de la scène visuelle, cette dernière

n'a eu aucun impact sur les variables dépendantes mesurées. Stedmon et al. [2009] concluent ainsi que les aspects relatifs à la fidélité fonctionnelle (*e.g.*, mode de conduite braquage ou contre-braquage) sont plus importants que ceux relatifs à la fidélité physique (*e.g.*, 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.

## 4.5 Conclusion

Il apparaît dans ce chapitre que la validation d'un simulateur constitue une étape fondamentale préalable avant toute utilisation de simulateurs en tant qu'outil de recherche et doit être fonction de l'utilisation que l'on veut en faire. C'est pourquoi, le type de validité recherché et l'approche de validation suivie peuvent différer selon les études. Certains auteurs ont tendance à privilégier une approche reposant sur la validation élément par élément du simulateur testé afin d'optimiser chaque paramètre du simulateur individuellement, alors que d'autres se focalisent sur une approche plus globale en évaluant le simulateur comme un tout. De plus, quelle que soit l'approche utilisée, le travail de validation se concentre le plus souvent sur une tâche bien particulière (*e.g.*, contrôle longitudinal ou latéral du véhicule, tâche de freinage, détection de situations dangereuses) en relation avec la finalité du dispositif. Parmi ces études, la majorité aborde le questionnement de la validité du simulateur testé pour l'étude du comportement du conducteur, à travers les sous-concepts de validité expérientielle (ou fidélité subjective de l'expérience) et/ou de validité éthologique (ou fidélité de l'action).

Néanmoins, il semble très difficile et très coûteux d'évaluer la validité éthologique qui nécessite une comparaison des comportements observés sur simulateur avec ceux observés dans des conditions similaires en environnement réel. De plus, au vue de ce chapitre il apparaît également important de se poser la question de l'apprentissage de nouvelles coordinations pendant les premiers temps d'exposition au simulateur. En effet, le simulateur doit permettre l'étude du comportement sans le modifier. La période d'acclimatation au dispositif apparaît ainsi déterminante pour la validité du simulateur. Cependant, celle-ci est rarement étudiée [Jamson et Smith, 2003; Kageyama et Tagami, 2002]. Par conséquent, de nombreux simulateurs de conduite sont utilisés en tant qu'outil de recherche alors que les travaux permettant de confirmer ce statut sont rarement disponibles. Parmi les cinq études qui se sont intéressées à la validité des simulateurs moto, seule une étude [Cossalter et al., 2010] a effectué la comparaison des résultats obtenus sur simulateur et sur véhicule réel, alors que la finalité des autres simulateurs testés s'y prêtait également. Des méthodes alternatives sont de plus en plus utilisées pour établir la validité des simulateurs. Neimer et Mohellebi [2009] ont ainsi cherché à évaluer la validité du simulateur de conduite automobile INRETS à travers l'exploitation de l'isomorphisme entre les propriétés des individus et celles de l'environnement. A cette fin, les auteurs ont tenté de déterminer si les différences interindividuelles observées en situation réelle et bien connues (*e.g.*, différence au niveau des temps de réaction entre les personnes dépendantes et celles indépendantes au champ visuel) sont reproduites en laboratoire sur simulateur de conduite, un constat positif constituant alors une preuve de la validité du simulateur (voir aussi Underwood et al., 2011).

La comparaison réelle/virtuelle, même si réalisée avec diverses tâches, pose la question des processus sous-jacents mis en œuvre en simulation. Premièrement, la phase de familiarisation sur simulateur pose le problème du développement éventuel de nouvelles coordinations visuo-motrices. Ensuite, il ne peut être exclu que les conducteurs aient recours à d'autres stratégies (visuelles par exemple, ou de contrôle du véhicule) ou que la charge mentale induite par le contrôle du simulateur excède la charge

induite naturellement par la conduite d'un deux-roues. Il pourrait donc être pertinent, pour la validation d'un simulateur 1) de s'intéresser en détail à la phase de familiarisation, afin d'évaluer l'impact de l'objet simulateur sur les comportements adoptés, 2) d'avoir recours à des tâches mettant les conducteurs sous haute pression spatio-temporelle (e.g., évitement) afin de vérifier si les réponses produites pour le contrôle de trajectoire (supposées être automatisées dans ce type de situation extrêmement contraignante) se distinguent profondément des réponses courantes mises en place par les conducteurs, 3) ou encore de s'intéresser à la charge induite par le simulateur en étudiant l'impact d'une double tâche sur le contrôle de trajectoire.

Sur la question des caractéristiques du mouvement de roulis, il apparaît une très forte disparité (probablement due au fait que peu d'études existent). Deux études ont retenu un algorithme de mouvement délivrant le roulis en continu [Kageyama et Tagami, 2002; Yamasaki et al., 1998], une étude a utilisé un simulateur statique avec contre-braquage [Stedmon et al., 2009], et une étude déclare avoir utilisé un filtre washout [Cossalter et al., 2010]. Dans cette dernière, il est dit que le roulis est rendu majoritairement par le visuel et qu'il est complété par une inclinaison de la cabine. Cependant, la référence à la notion de filtre washout est chargée de sens : elle implique la production d'un mouvement « court » restituant les accélérations transitoires subies dans l'entrée d'un virage et le retour à une situation d'équilibre (correspondant à la phase stable du virage) sous le seuil de perception du mouvement. Néanmoins, aucune donnée, pourtant intéressante et fondamentale par rapport à la problématique de la validation (e.g., Groen et Bles, 2004, sur la question du tilt-coordination en simulation de conduite automobile), n'est disponible concernant les caractéristiques du filtre washout voire même concernant la stimulation retenue pour la sortie de virage (mouvement d'inclinaison en sens opposé à la direction du virage ? effet sur le conducteur et son engagement dans l'environnement ?). D'autre part, la pertinence d'un filtre washout pour la simulation de conduite moto reste à confirmer compte tenu de nos connaissances limitées sur l'alignement ou non des différents segments corporels sur la résultante de la FGI. Pour ce qui concerne les simulateurs délivrant un mouvement de roulis continu, aucune référence n'est faite à une possible sensation de chute [Kageyama et Tagami, 2002; Yamasaki et al., 1998].

A propos de la définition des caractéristiques du mouvement de roulis, les études disponibles ont été réalisées avec peu de participants et/ou avec des experts de la conduite moto. Là encore, la question se pose de la généralisation possible des données produites. D'une part, la perception du mouvement propre et l'interprétation des stimulations inertielles sur simulateur est un phénomène éminemment hétérogène (e.g., Neimer et Mohellebi, 2009). D'autre part, les applications visées par ces différents simulateurs portent sur l'étude des comportements des conducteurs, supposés tout venant. Le dimensionnement des mouvements des plates-formes dynamiques par des experts de la conduite est donc sujet à caution, vu les applications visées et l'hétérogénéité rencontrée sur simulateur. Enfin, les études présentées ont procédé à une évaluation subjective de mouvements prédéfinis a priori et délivrés automatiquement en cours de conduite [Kageyama et Tagami, 2002; Yamasaki et al., 1998] ou à la recherche d'une configuration optimale entre roulis physique et visuel par une approche itérative réalisée par des experts de la moto, également ingénieurs en charge du développement du simulateur [Cossalter et al., 2010]. Il pourrait donc s'avérer pertinent de procéder au dimensionnement des caractéristiques du mouvement de roulis en s'appuyant sur la sélection, par une population de conducteurs tout venant, de ces caractéristiques.

Dans le cadre de cette thèse une nouvelle approche est proposée pour appréhender les similitudes du comportement entre environnement réel et virtuel (validité éthologique), au travers du concept de présence. Quelques études [Johnson et al., 2011; Tichon et al., 2006; Tichon, 2007] se sont appuyés

sur ce concept comme un outil d'évaluation des simulateurs de conduite automobile ou de train, mais uniquement dans des situations de conduite générant un état de stress. Bien qu'il apparaisse dans la littérature que le concept de présence soit un phénomène complexe et multidimensionnel sous-tendant de très nombreuses définitions, dans le cadre de cette thèse, la présence est considérée comme la capacité des individus à répondre à des informations sensorielles générées virtuellement comme si elles étaient réelles [Slater et al., 2009]. En conséquence, le sentiment de présence ressenti refléterait l'adoption d'un comportement dans l'environnement virtuel similaire à celui que l'individu adopterait dans des circonstances similaires de la vie de tous les jours [Slater, 2002; Slater et al., 2009]. L'hypothèse sous-jacente est ainsi qu'un individu éprouvant un fort sentiment de présence dans l'environnement virtuel réagira dans cet environnement comme s'il était réel. Cette propriété de la présence est par ailleurs très souvent exploitée dans le cadre de thérapies par réalité virtuelle pour traiter différentes phobies [Botella, 1998; Garcia-Palacios et al., 2002; Krijn et al., 2004; Malbos et al., 2008].

Facteurs déterminants pour atteindre un sentiment de présence, l'immersion et l'interaction (forme du média), décrivant les caractéristiques liées à la technologie, définissent également le niveau de validité physique (ou fidélité physique) d'un simulateur. Il semble donc nécessaire de ne pas trop compromettre la validité physique du simulateur et de configurer au mieux ses systèmes de restitution (en fonction des moyens technologiques, financiers et humains disponibles) afin de produire la « bonne illusion » favorisant l'adoption d'un comportement sensori-moteur similaire à celui que le conducteur adopterait en situation réelle, cette similitude du comportement impliquant de manière implicite un fort sentiment de présence.

Enfin, il semble essentiel d'intégrer à la notion de validité la notion de mal du simulateur. Dans ce chapitre, il a été mis en évidence que le mal du simulateur engendrait parfois des symptômes physiologiques associés sévères et fréquents pouvant entraver la validité du simulateur, affecter l'utilité de la simulation et réduire le sentiment de présence ressenti. Le mal du simulateur nécessite d'être contrôlé de manière systématique par une évaluation tout au long du processus de validation du simulateur. Or, peu d'études encore aujourd'hui contrôlent sa survenue et son intensité de façon méthodique. Comme le suggèrent [Pinto et al., 2008], ce phénomène ne sera ainsi pas traité dans le cadre de cette thèse en tant qu'objet d'étude principal mais en tant qu'indicateur d'une faible validité psychologique et fera l'objet d'une évaluation rigoureuse continue.



## Chapitre 5

# Synthèse de la revue de littérature

L'analyse relative à l'accidentologie des deux-roues motorisés a permis de mettre en évidence un risque accru pour les motocyclistes en comparaison aux autres catégories d'utilisateurs, et de souligner ainsi le besoin de développer et de mettre en place des outils pour réduire cette sinistralité. La simulation de conduite offre à la fois une nouvelle opportunité pour appréhender le comportement des conducteurs dans un cadre sécuritaire et constitue un outil alternatif pour la formation à la conduite.

Le développement des simulateurs de conduite nécessite une connaissance approfondie des mécanismes mettant en jeu la perception multisensorielle du mouvement propre. Pour la simulation de conduite motocycliste, les mécanismes relatifs à la perception du mouvement de roulis sont essentiels en raison de la présence continue de ce mouvement lors de la conduite moto. À partir de l'étude bibliographique, il apparaît que bien que la vision joue un rôle majeur dans cette activité de conduite, les informations délivrées par le système vestibulaire et somesthésique sont critiques pour générer, après l'intégration des différents signaux par le cerveau selon un cadre de référence approprié, une perception précise et unifiée de l'orientation du corps dans l'espace.

Toutefois, la limitation des déplacements des plates-formes mobiles des simulateurs dynamiques rend impossible une reproduction fidèle des stimuli perceptifs et nécessite la production d'une bonne illusion capable de leurrer la perception des conducteurs afin de créer un ressenti naturel du mouvement. Cette limitation des plates-formes mobiles implique donc de considérer la question de la validité du simulateur avant toute utilisation en tant qu'outil de formation ou de recherche. La revue de littérature relative au champ de la validité des environnements virtuels et en particulier des simulateurs de conduite, a souligné l'existence d'une profusion de définitions associées au concept de validité. Il apparaît également que la validité recherchée doit être fonction de la finalité d'usage du simulateur.

Pour l'étude du comportement, la réalisation d'une comparaison entre les performances de conduite obtenues en situation réelle et celles produites en simulation constitue la méthode idéale et finale de la démarche de validation en définissant ainsi le degré de validité comportementale (éthologique ou fidélité de l'action) du simulateur. Toutefois, nous avons pu constater, au cours de l'étude bibliographique que cette méthode est peu entreprise en raison notamment de sa complexité de mise en œuvre (coût élevé, contrôle des variables en situation réelle, etc.). La majorité des études relatives à la simulation moto s'intéresse ainsi plutôt à la validité expérientielle, en d'autres termes au ressenti subjectif de l'expérience, plutôt qu'au degré de validité éthologique du simulateur.

À l'heure actuelle, la problématique relative à la mise au point de la simulation de vol ou de conduite automobile rend compte d'une complexité et de difficultés relativement bien circonscrites en comparaison à la simulation motocycliste. Cette difficulté est due principalement au fait que la conduite moto se

caractérise par une haute dynamique et constitue la seule activité de conduite impliquant le maintien d'un équilibre actif continu du conducteur et une mobilisation permanente des ressources cognitives et motrices. De plus, aucune étude ne s'est encore aujourd'hui intéressée aux actions produites par le conducteur pour maintenir cet équilibre continu en moto ; par conséquent, le développement de la simulation moto s'appuie sur peu d'éléments théoriques en comparaison à la simulation de conduite automobile ou de vol.

Ce travail de thèse s'inscrit dans ce contexte et procède aux premières étapes de validation du simulateur IFSTTAR. Son objectif vise également à enrichir les connaissances relatives aux méthodologies associées à la validité des simulateurs ainsi que les connaissances liées à la perception du mouvement propre sur simulateur moto, qui ont été peu étudiés à l'heure actuelle.

Pour conclure, ce travail de thèse s'appuiera dans un premier temps sur une approche élément par élément, dans le but d'optimiser l'espace de mouvement de roulis à restituer par la plate-forme mobile. Dans un second temps, ce travail reposera alors sur une approche globale en évaluant le simulateur dans sa totalité à travers des mesures objectives et subjectives lors de la phase de familiarisation des conducteurs sur le simulateur IFSTTAR. D'autre part, ce travail proposera également une approche alternative à la validité éthologique pour étudier les similitudes du comportement entre environnement réel et virtuel, au travers du concept de présence. Enfin, ce travail s'appuiera également sur le phénomène du mal du simulateur pour évaluer la validité du simulateur puisque ce dernier constitue un indicateur de faible validité psychologique.

## Plan de lecture de la partie expérimentale

La partie expérimentale de ce travail de thèse se compose de sept études. Les six premières expériences s'appuient sur une approche élément par élément où nous avons cherché à dimensionner l'espace de mouvement de roulis afin d'optimiser à la fois la détection de mouvement et de l'inclinaison propre, et minimiser la sensation de chute produite sur simulateur.

**Au cours de l'expérience 1**, nous avons étudié l'influence de la cinématique (vitesse de roulis), de la direction d'inclinaison et de la condition visuelle (yeux fermés/yeux ouverts) sur la sensibilité des conducteurs au mouvement de roulis (détection du mouvement, inclinaison et perception de la chute).

**Au cours de l'expérience 2**, expérience exploratoire, nous avons étudié l'influence du positionnement de l'axe de roulis sur la sensibilité des conducteurs au mouvement de roulis, suite aux modifications apportées à l'architecture structurelle du simulateur. Cette seconde étude a permis de sélectionner un positionnement de l'axe de roulis à privilégier et à conserver pour les études suivantes.

**Au cours de l'expérience 3**, nous avons cherché à déterminer la contribution du roulis visuel et du roulis physique pour la production d'une sensation d'inclinaison « réaliste ».

S'appuyant sur les résultats de la troisième étude, **au cours de l'expérience 4**, nous avons étudié l'influence du couplage préférentiel entre le roulis visuel et le roulis physique sur les seuils de détection du mouvement et de l'inclinaison et le seuil de perception de la chute.

Ces quatre expériences ont été réalisées avec le premier dispositif de restitution visuelle, composé d'un seul écran plat, le second dispositif de restitution visuelle comprenant un mur d'écrans n'étant pas encore opérationnel. A la suite de l'expérience 4, cette salle immersive fut opérationnelle. Par conséquent, nous avons choisi de dupliquer les expériences 3 et 4 afin d'évaluer l'influence potentielle de la

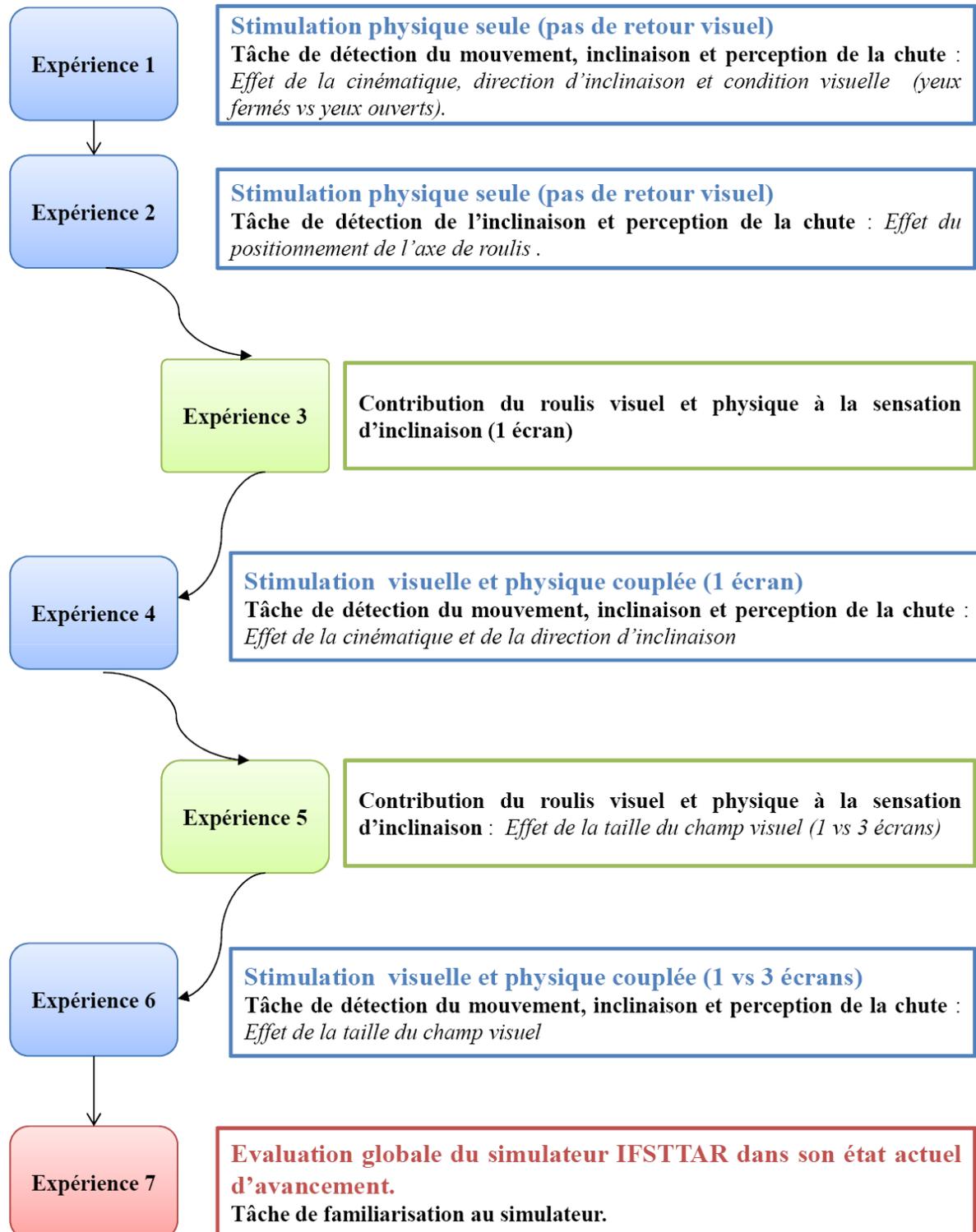
taille du champ visuel sur la sensibilité des conducteurs au mouvement de roulis.

**Au cours l'expérience 5**, nous avons ainsi étudié l'influence de taille du champ visuel (1 écran/3 écrans) sur la contribution du roulis visuel et physique à la production d'une illusion d'inclinaison crédible.

S'appuyant sur les résultats de la cinquième étude, nous avons déterminé **au cours de l'expérience 6** l'influence de la taille du champ visuel sur la détection du mouvement et de l'inclinaison et sur la perception de la chute.

Pour conclure ce travail de thèse, nous avons conduit **une septième étude** reposant sur une approche globale où nous avons cherché à évaluer la validité du simulateur IFSTTAR dans son état actuel d'avancement, à travers la phase de familiarisation des conducteurs.

## Articulation des sept expériences composant la partie expérimentale



**Deuxième partie**

**Cadre expérimental**



# Chapitre 6

## Méthode générale

### 6.1 Participants

Pour l'ensemble des expérimentations, les participants ont été recrutés au moyen d'annonces postées sur les listes de diffusion de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) et sur des forums motocyclistes. Les annonces ont également été diffusées avec l'aide de la Fédération Française des Motards en Colère aux différentes antennes associatives motocyclistes adhérentes ainsi que sur le site en ligne de motomag.com. Les participants recrutés ont été sélectionnés sur la base de quatre critères d'inclusion : (i) âge compris entre 20 et 50 ans ; (ii) posséder le permis A (moto) ; (iii) parcourir en moto au moins 4000 km par an ; (iv) n'avoir connaissance d'aucune déficience sensorielle (visuelle non corrigée, auditive, vestibulaire ou somesthésique). L'ensemble des études présentées dans cette thèse a été approuvé par le Comité d'Éthique pour la Recherche Biomédicale (CERB) de l'IFSTTAR. Les caractéristiques exactes des participants de chaque expérience sont présentées dans le tableau 6.1. A cette fin, les variables démographiques relatives à l'âge, le sexe, l'année d'obtention du permis moto et le nombre moyen de kilomètres parcourus par an en moto ont été recueillies à chaque expérience. Seuls les participants des expériences 2 et 7 ont été indemnisés pour leur participation à hauteur, respectivement, de 50 et 75 euros.

TABLE 6.1 – Données démographiques des participants selon chaque expérience.

		Expériences							
		1	2	3	4	5	6A	6B	7
Nombre de participants		15	8	22	29	29	16	27	38
Nombre d'hommes		13	6	17	24	27	15	27	32
Nombre de femmes		2	2	5	5	2	1	0	6
Age (ans)	M	33,9	31,8	33,4	36,4	36	31,9	35,5	32,7
	ET	7,4	3,8	7,2	7,9	8,1	8,1	9,3	7,3
Années de permis A	M	10,3	8,8	10,8	11,8	11,3	9,1	11,9	9,1
	ET	7,9	6,6	7,4	8,4	8,9	7,1	8,5	6,4
Kilomètres parcourus / an	M	14333	13750	13068	14081	16897	18688	17500	15681
	ET	7914	7382	7591	8642	10658	22072	12531	8604

Note : M = moyenne , ET = écart type

## 6.2 Dispositif expérimental

### 6.2.1 Architecture du simulateur IFSTTAR

Les expériences présentées dans cette thèse se sont déroulées sur le simulateur à base mobile IFSTTAR (voir section 3.3.7 pour une description détaillée). Les vitesses angulaires retenues pour les différentes études ont été obtenues par l'envoi de commandes de changement de position aux vérins à une fréquence de 200 Hz.

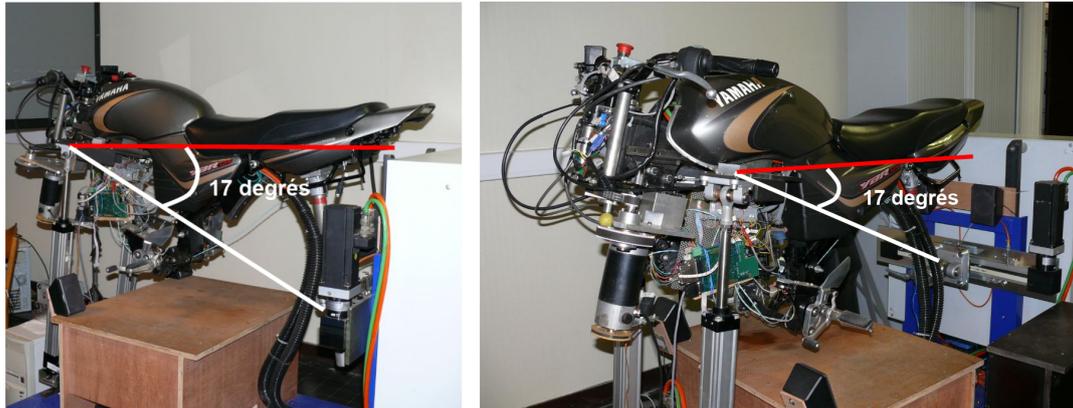


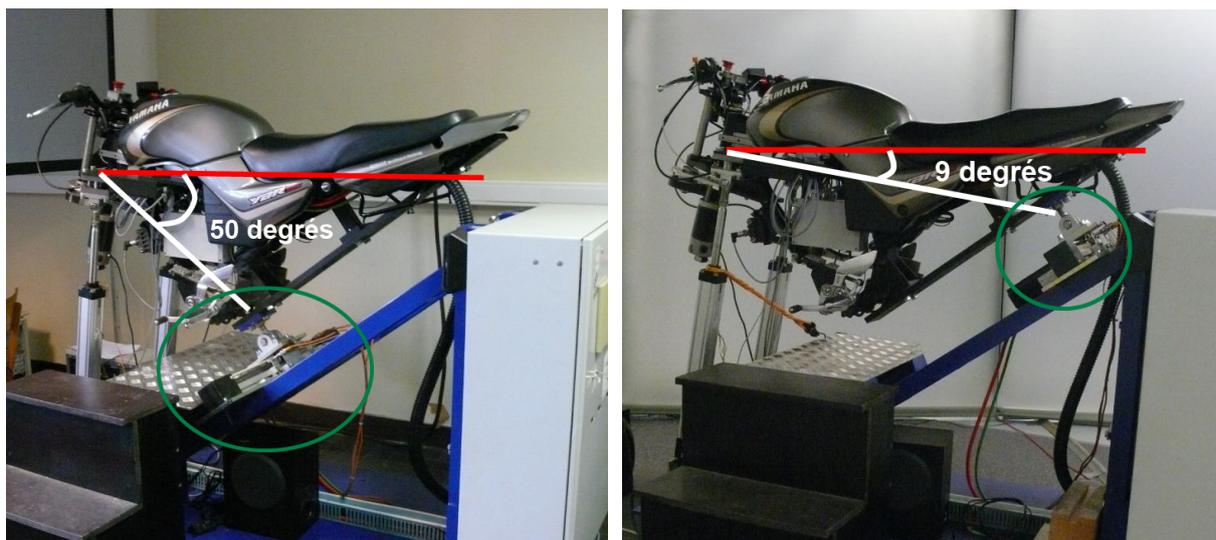
FIGURE 6.1 – Première version du simulateur IFSTTAR comportant un axe de roulis incliné à 17 degrés.

En constant développement, d'importantes modifications mécaniques ont été apportées au simulateur IFSTTAR, dont un changement de position de l'axe de roulis au cours de ce travail doctoral. La première expérience réalisée au cours de cette thèse s'est ainsi déroulée sur la première version du simulateur (figure 6.1). Dans cette version, la position des axes de rotation a été définie à partir de la cinématique d'une moto réelle. L'axe de roulis est pris dans le plan de symétrie de la moto. La conception mécanique du simulateur implique que l'axe de roulis soit incliné de 17 degrés vers le sol entre l'avant et l'arrière de la moto (figure 6.1). L'axe du tangage passe par l'arrière de la moto et est reproduit par un déplacement vertical de la fourche durant les phases d'accélération ou de décélération.

Les expériences suivantes ont été conduites sur la nouvelle et actuelle version du simulateur (figure 6.2). Dans cette version, le simulateur présente deux rails qui ont été fixés en position oblique respectivement sur la partie mobile (rail de couleur noire fixé sur le cadre de la moto, sous la selle) et sur la partie fixe (rail de couleur bleue constituant le bâti) de la plate-forme. Ces deux rails sont reliés par une rotule qui peut être placée à l'une des trois positions prévues, ces trois positions ayant un effet sur les axes de rotation pour les mouvements de roulis et de tangage.

### 6.2.2 Restitution du roulis pendant la phase d'équilibre du virage : Caractérisation de la cinématique du mouvement lors d'une inclinaison en roulis

Devant l'absence de travaux rendant compte objectivement des positions et actions des conducteurs sur leur moto, permettant de spécifier a priori les sollicitations auxquelles ils sont soumis en situation réelle, et devant la présomption forte d'un non-alignement des segments corporels (tête et corps) sur la résultante gravito-inertielle, les travaux de cette thèse s'appuient sur l'hypothèse que les conducteurs, de par leur comportement sur la moto, peuvent être soumis à des accélérations pendant la phase d'équilibre



(a) Point d'ancrage bas de la rotule (entourée par un cercle vert) et l'axe de roulis incliné à 50 degrés (représenté par une ligne blanche) par rapport à un axe horizontal (représenté en rouge).

(b) Point d'ancrage haut de la rotule (entourée par un cercle vert) et l'axe de roulis incliné à 9 degrés (représenté par une ligne blanche) par rapport à un axe horizontal (représenté en rouge).

FIGURE 6.2 – Version actuelle du simulateur IFSTTAR. Sont présentées, les deux positions extrêmes de la rotule.

du virage. Par conséquent, l'approche suivie dans le cadre de cette thèse consiste à restituer une inclinaison continue durant la phase (supposée) d'équilibre du virage.

Afin de rendre compte des profils de vitesse et d'accélération restitués par la plate-forme mobile du simulateur IFSTTAR, une centrale inertielle a été installée sur ce dernier. Typiquement, pour connaître les accélérations et vitesses perçues par le conducteur (via les capteurs vestibulaires) sur le simulateur, une fixation au niveau de la tête du conducteur est essentielle. Toutefois, un tel positionnement implique des mouvements parasites de la tête du conducteur, sources de bruit de mesure. De plus, la centrale inertielle nécessite d'être fixée sur une zone plate. A cette fin, celle-ci a été installée à l'aplomb du guidon au niveau des fixations du cadre. La distance entre la centrale inertielle et la tête du conducteur, assis sur le simulateur, était de 50 cm. Par conséquent, les vitesses et accélérations perçues par le conducteur seront supérieures à celles mesurées par la centrale inertielle en raison de la distance la séparant de la tête du conducteur. Pour des raisons logistiques, les mesures réalisées à partir de la centrale inertielle n'ont pu être effectuées que sur la version actuelle du simulateur avec l'axe de roulis incliné à 9 degrés par rapport à un axe horizontal. Pour chaque vitesse angulaire constante (*i.e.*, 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 8 ; 12 ; 16 ; 32 ; 48  $\text{deg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) utilisée lors des expériences de cette thèse (expériences 2, 4 et 6), une mesure des profils d'accélération (longitudinale, latérale, et de roulis) et des vitesses de roulis a été réalisée au moyen de la centrale inertielle. La vitesse de roulis a été filtrée afin d'enlever une partie du bruit de mesure (*e.g.*, vibrations du simulateur par le déplacement des vérins en mouvement). Afin d'avoir un aperçu global des accélérations produites par la plate-forme mobile, les données brutes des accélérations (de roulis, latérale tangentielle (transitoire) et longitudinale) issues de la centrale inertielle sont présentées dans la figure 6.3 uniquement pour la vitesse de 1  $\text{deg}\cdot\text{s}^{-1}$ . De même, comme le profil des vitesses de roulis est similaire pour chacune des vitesses testées, seul le profil de la vitesse de roulis filtrée obtenu pour cette même vitesse de 1  $\text{deg}\cdot\text{s}^{-1}$  est présenté dans la figure 6.4.

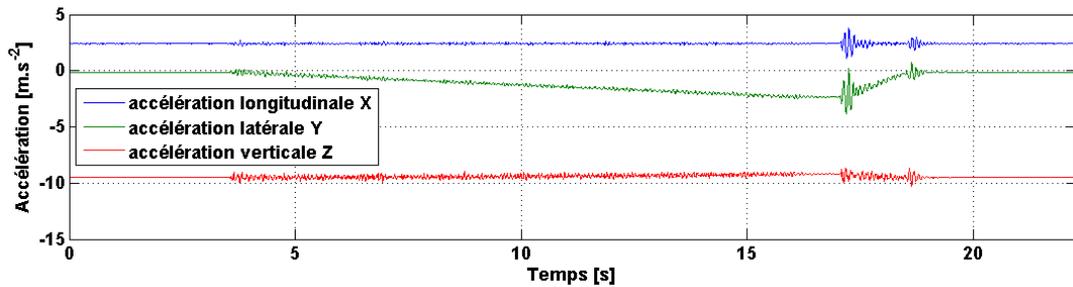


FIGURE 6.3 – Accélérations brutes issues de la centrale inertielle, établies pour une vitesse constante de rotation en roulis de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$ . On peut constater, pour chaque profil d'accélération, le début de la rotation à partir de 4 s, la phase d'arrêt d'1 s du simulateur à l'angle limite (12,5 degrés) à la 16<sup>ème</sup> seconde et enfin la phase de retour du simulateur en position neutre.

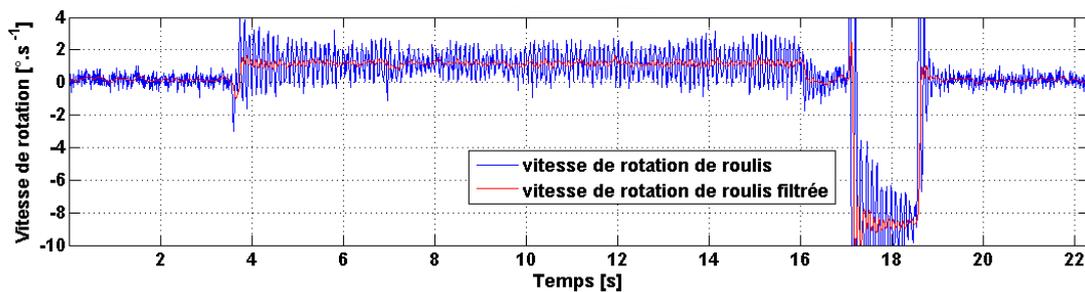
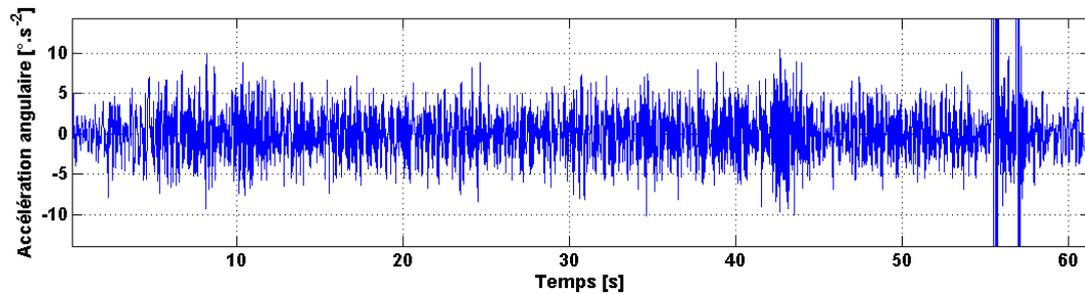


FIGURE 6.4 – Profil de la vitesse de roulis pour une vitesse constante de rotation de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$ . Par convention, lorsque l'inclinaison du simulateur est du côté droit les vitesses de roulis sont notées positives, à l'inverse elles sont négatives lors des inclinaisons du côté gauche. Le début de la rotation commence également à partir de la 4<sup>ème</sup> seconde. On peut constater que la vitesse de roulis diminue à partir de 12 s de test pour atteindre à l'angle limite d'inclinaison (12,5 degrés) une vitesse nulle durant 1 s, qui correspond à l'arrêt effectué en fin d'essai avant le retour en position neutre du simulateur. A la suite de cet arrêt, la vitesse de roulis augmente jusqu'à  $8 \text{ deg.s}^{-1}$ , puis diminue jusqu'au retour de la plate-forme mobile en position neutre où la vitesse devient alors nulle.

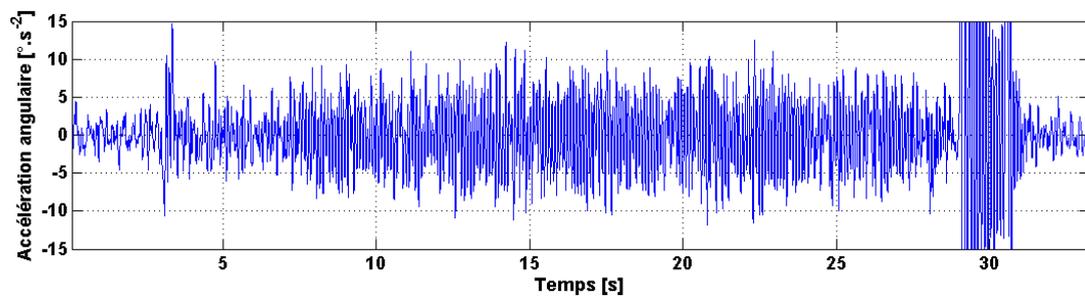
Ces mesures de cinématique sont essentielles pour une meilleure compréhension des capteurs sensoriels sollicités lors de l'inclinaison du simulateur à vitesse constante. En effet, à partir des figures 6.5a, 6.5b et 6.5c, nous pouvons constater que l'accélération angulaire produite pour établir une rotation à vitesse constante est comprise entre 0 et  $5 \text{ deg.s}^{-2}$ . Toutefois, à partir de la vitesse de roulis de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ , on peut remarquer que le profil de mouvement de roulis produit par la plate-forme mobile indique de façon distincte un pic d'accélération angulaire en début de rotation d'approximativement  $10 \text{ deg.s}^{-2}$ , avant de décroître et devenir constante pour une valeur comprise dans le bruit de mesure ( $\pm 5 \text{ deg.s}^{-2}$ ). On constate ce même profil pour les accélérations produites pour établir des vitesses de roulis supérieures (voir figure 6.5c, pour la vitesse de roulis de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$  à titre d'illustration), avec un pic d'accélération en début de rotation de plus en plus important avec la vitesse de roulis testée.

Comme sur simulateur de vol, il est rapporté dans la littérature des valeurs de seuils des canaux semi-circulaires variant de 0,2 à  $1,6 \text{ deg.s}^{-2}$  en fonction de la fréquence de la vitesse angulaire du stimulus [Heerspink et al., 2005]. Les valeurs obtenues à partir de la centrale inertielle qui sont supérieures au seuil de détection des canaux semi-circulaires, indiquent donc une sollicitation des canaux semi-circulaires de manière certaine dès la vitesse de roulis de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ . A la vitesse de roulis de  $0,25 \text{ deg.s}^{-1}$ , comme l'accélération angulaire produite reste comprise au niveau du bruit de mesure et que ce dernier comporte des valeurs supérieures au seuil de détection des canaux semi-circulaires, on ne peut toutefois

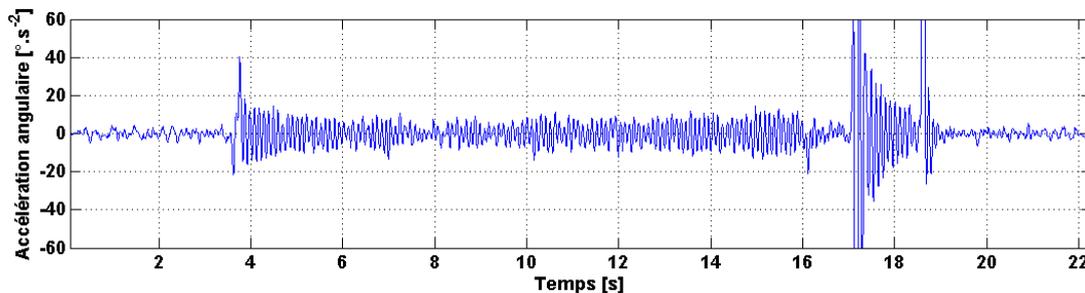
pas négliger la sollicitation des récepteurs canaliculaires lors de la rotation en roulis à cette faible vitesse. On peut noter également à partir des figures 6.5a, 6.5b et 6.5c, que pour chaque retour du simulateur en position neutre en fin de test, l'accélération angulaire produite est supérieure au seuil de détection des canaux semi-circulaires, ces derniers peuvent ainsi signaler ce nouveau mouvement au cerveau.



(a) Vitesse constante de rotation en roulis de  $0,25 \text{ deg.s}^{-1}$ .



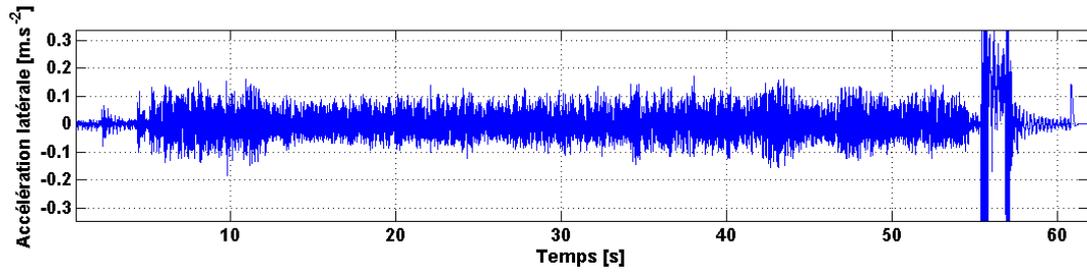
(b) Vitesse constante de rotation en roulis de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ .



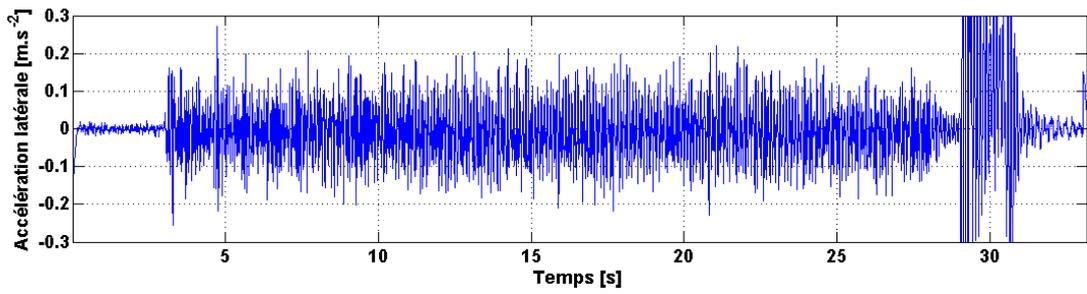
(c) Vitesse constante de rotation en roulis de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$ .

FIGURE 6.5 – Profil de l'accélération angulaire en fonction de la vitesse de roulis.

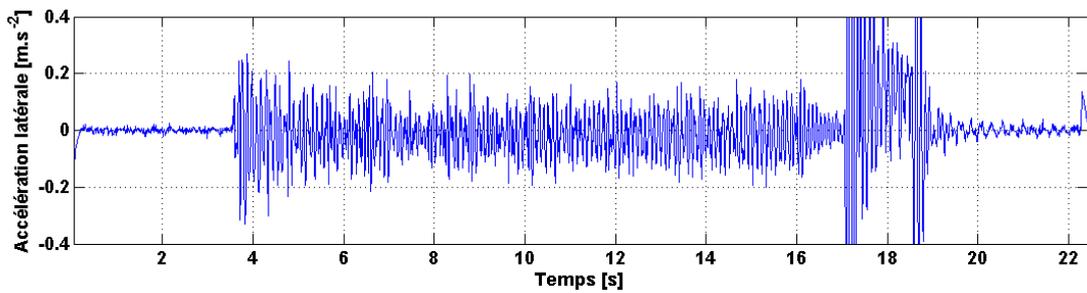
De la même manière, on peut constater que l'accélération latérale tangentielle (ou transitoire) produite lors d'une rotation à vitesse constante est comprise entre 0 et  $0,2 \text{ m.s}^{-2}$  (figure 6.6). Toutefois, à partir de la vitesse de roulis de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$  on remarque que le profil de mouvement de roulis produit par la plate-forme mobile indique de façon distincte un pic d'accélération latérale en début de rotation de  $0,6 \text{ m.s}^{-2}$ , avant de décroître et devenir constante pour une valeur comprise au niveau du bruit de mesure ( $\pm 0,2 \text{ m.s}^{-2}$ ). On constate ce même profil pour les accélérations produites lors des vitesses de roulis supérieures (voir figure 6.6e, pour la vitesse de roulis de  $4 \text{ deg.s}^{-1}$  à titre d'illustration), avec un pic d'accélération en début de rotation de plus en plus important avec la vitesse de roulis testée.



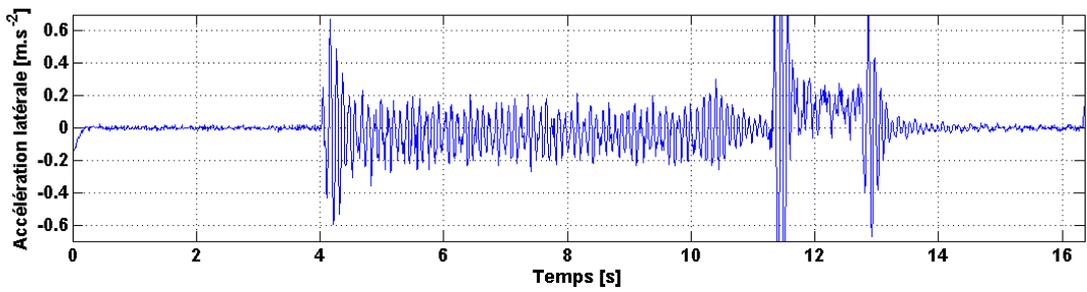
(a) Vitesse constante de rotation en roulis de  $0,25 \text{ deg.s}^{-1}$ .



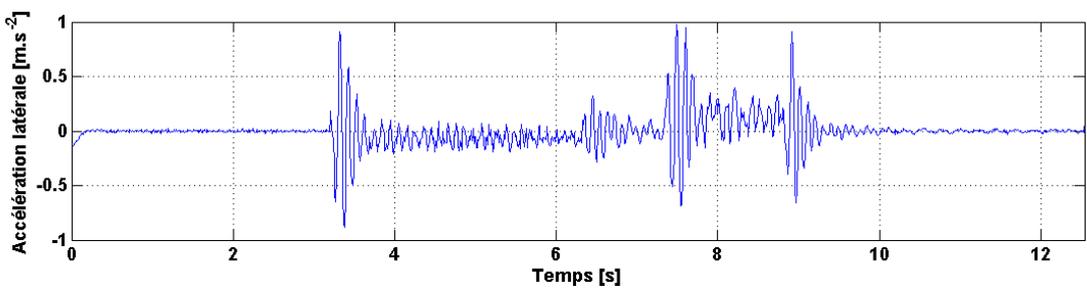
(b) Vitesse constante de rotation en roulis de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ .



(c) Vitesse constante de rotation en roulis de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$ .



(d) Vitesse constante de rotation en roulis de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ .



(e) Vitesse constante de rotation en roulis de  $4 \text{ deg.s}^{-1}$ .

FIGURE 6.6 – Profil de l'accélération latérale tangentielle (transitoire) en fonction de la vitesse de roulis.

En parallèle, il est rapporté dans la littérature un seuil moyen de détection des organes otolithiques de  $4,84 \text{ cm.s}^{-2}$  [Gianna et al., 1996]. Les valeurs obtenues à partir de la centrale inertielle indiquent donc une sollicitation des organes otolithiques de manière certaine à partir de la vitesse de roulis de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ . Néanmoins, aux vitesses de roulis inférieures, comme l'accélération latérale produite reste comprise au niveau du bruit de mesure et sachant que ce dernier comporte des valeurs supérieures au seuil de détection des organes otolithiques, la sollicitation des récepteurs otolithiques lors de la rotation en roulis à cette faible vitesse ne peut être négligée. On peut noter également à partir des figures 6.6a à 6.6e, que pour chaque retour du simulateur en position neutre en fin de test, comme l'accélération latérale produite est supérieure au seuil de détection des organes otolithiques, ces récepteurs vestibulaires signalent cette accélération au cerveau.

### 6.2.3 Restitution visuelle

Comme nous l'avons précisé au chapitre 3, la restitution visuelle de ce simulateur peut s'effectuer par différents systèmes de projection. Au cours de cette thèse, deux systèmes de projection ont été utilisé :

- (i) Un écran (premier dispositif, voir figure 6.7), de 1,77 m de large et 1,28 m de hauteur, couvrant 72 degrés de champ de vision horizontal et 54 degrés de champ de vision vertical (pour une distance de 1 m entre l'écran et le simulateur),
- (ii) Un mur d'écrans (dispositif actuel, voir figure 6.8), ce mur étant composé de 1 à 3 écrans de 1,88 m de large sur 2,40 m de hauteur chacun (pour une distance de 1,63 m entre les écrans et le simulateur). Ce support de projection permettait de couvrir un champ de vision horizontal de 60 à 180 degrés (en configuration 1 ou 3 écrans, respectivement) et 80 degrés de champ de vision vertical.



FIGURE 6.7 – Premier dispositif de restitution visuelle (1 écran).

Les quatre premières expériences présentées dans cette thèse se sont déroulées avec la première configuration de restitution visuelle décrite ci-dessus. Une fois la salle immersive (comprenant le mur

d'écrans) développée, les expériences suivantes (expériences 5, 6A, 6B et 7) ont pu être menées avec le second système de restitution visuelle.

Comme les simulateurs DIGEM et Honda, l'inclinaison en roulis de la moto virtuelle peut être restituée par une inclinaison de l'horizon visuel et par le mouvement de roulis du châssis du simulateur. Le degré de ces roulis visuel et physique est fonction des facteurs d'échelle implémentés au niveau de la stratégie de commande, qui restituera une inclinaison continue de roulis durant la phase d'équilibre et non un retour vers une position neutre.



(a) Scène visuelle projetée sur un écran.



(b) Scène visuelle projetée sur trois écrans.

FIGURE 6.8 – Dispositif actuel de restitution visuelle, composé d'un mur d'écran.

#### 6.2.4 Restitution sonore

Enfin, le système de restitution sonore, qui génère un son spatialisé provenant de l'enregistrement de bruit moteur d'un véhicule automobile, était composé de 2 haut-parleurs. Ce dispositif a uniquement été utilisé lors de l'expérience finale (expérience 7). En effet, les expériences précédentes impliquaient divers types de sollicitation (*e.g.*, inclinaison aller-retour de la plate-forme avec arrêt en position neutre, avec ou sans restitution visuelle). Dans ces situations, la restitution du bruit moteur étant susceptible d'influencer les seuils de détection, cet apport d'information complémentaire n'a pas été retenu.

## Chapitre 7

# **Expérience 1 : Étude de la sensibilité des conducteurs au mouvement de roulis sur simulateur moto : Effet de la cinématique du mouvement, de la direction d'inclinaison et de la condition visuelle sur les seuils de détection du mouvement et de l'inclinaison et le seuil de perception de la chute.**

### **7.1 Motivation et problématique de l'étude**

Dans le domaine des simulateurs de conduite à plate-forme dynamique, la problématique du dimensionnement des mouvements restitués est centrale pour la question de leur validité en vue d'étudier les comportements de leurs utilisateurs. En effet, la revue bibliographique a montré que l'apport d'informations de mouvement sur simulateur était prépondérant pour la performance de conduite dans des tâches à dominante sensorimotrice telles que le freinage ou le contrôle latéral de trajectoire [Greenberg et al., 2003; Malaterre et Fréchaux, 2001; McLane et Wierville, 1975; Siegler et al., 2001]. Ces résultats soulignent donc le rôle déterminant des informations vestibulaires et somatosensorielles dans la perception du mouvement propre [Israël et al., 2004]. Cependant, il est impossible de restituer sur simulateur l'ensemble des stimulations physiques réelles du fait des limites en déplacement de toute plate-forme mobile (e.g., accélérations continues). Ce constat entache donc clairement la validité physique [Godley et al., 2002; Törnros, 1998] ou fidélité du stimulus de tout simulateur dynamique [Stoffregen et al., 2003]. Par conséquent, quelques travaux ont cherché à déterminer l'espace de mouvement des plates-formes dynamiques nécessaire et pertinent en s'appuyant sur des protocoles de psychophysique expérimentale ou de neuroscience comportementale afin de contribuer au mieux à la conception des algorithmes de mouvement. Ces travaux se sont pour cela intéressés au seuil de détection de l'inclinaison quasi-statique en tangage et roulis [Bisdorff et al., 1996; Bringoux et al., 2002; Groen et Bles, 2004; Otakeno et al., 2002], au seuil de détection de la rotation en roulis [Heerspink et al., 2005; Meiry, 1965], à la quantité de mouvement nécessaire à la perception de la direction du mouvement de roulis [Benson et Brown, 1989; Gundry, 1977; Huang et Young, 1981] ou encore à l'évaluation subjective (par les utilisateurs) et objective (effets sur les performances) de différents algorithmes de restitution du mouvement [Colombet et al., 2008; Groen et al., 2000, 2007; Reid et Nahon, 1988].

Contrairement à la simulation de conduite automobile où l'absence de force centrifuge est peu problématique lors des changements de direction, en simulation de conduite moto l'absence de cette force est susceptible de générer une sensation de chute. En effet, la seule présence de la force gravitaire sur simulateur est signalée par les inclinomètres que sont les organes otolithiques et par les récepteurs somesthésiques qui renseignent sur les variations des stimulations tactiles et de pression. De plus, une accélération tangentielle (latérale) peut potentiellement être détectée, selon l'intensité de celle-ci, par les organes otolithiques. Cette accélération latérale transitoire est produite sur simulateur lorsque la rotation de ce dernier est produite selon un axe éloigné du centre de la tête.

Il s'agit donc pour la simulation de conduite moto de chercher à établir un compromis en restituant une vitesse angulaire suffisante pour signaler le début du mouvement de roulis en entrant dans le virage, ainsi qu'un angle de roulis minimum permettant de ressentir une inclinaison et maximum permettant de prévenir toute sensation de chute ou de déséquilibre critique.

Sur cette base, et devant le nombre limité de travaux appliqués aux simulateurs dynamiques de conduite moto, le but de cette étude était de mieux connaître la sensibilité des conducteurs de deux-roues au mouvement de roulis afin de dimensionner les mouvements de la plate-forme mobile. Cette étude a donc cherché à identifier :

- 1) Le seuil de détection du mouvement de roulis,
- 2) Le seuil de détection de l'inclinaison,
- 3) Le seuil de perception de la chute.

Sur la base de l'étude bibliographique, et afin de circonscrire au mieux ces différents seuils, il apparaît également nécessaire d'étudier l'impact de différents facteurs sur la sensibilité des conducteurs au mouvement de roulis, à savoir : (i) la cinématique du mouvement, (ii) la direction de l'inclinaison, (iii) la condition visuelle.

Par cette manipulation de la vitesse de roulis, nous attendons, dans un premier temps, une diminution du temps nécessaire à la détection du mouvement (temps écoulé entre la présentation du stimulus et la réponse du participant) avec l'augmentation de la vitesse angulaire puisqu'il est reconnu que le temps de réponse à une détection suit une loi générale, appelée la loi de Piéron. Selon cette loi, le temps de réponse varie en fonction de l'intensité du stimulus (*e.g.*, vitesse angulaire) en diminuant comme une fonction de puissance de l'intensité de la stimulation. En revanche, nous supposons que le seuil de détection de l'inclinaison (exprimé en angle) devrait être constant quelle que soit la vitesse angulaire du stimulus puisque l'inclinaison considérée dans la littérature comme quasi-statique, est signalée en raison d'un changement d'orientation par rapport à la verticale gravitaire principalement par les organes otolithiques et en raison des modifications tactiles et de pression par les récepteurs somesthésiques. Par conséquent, le temps de réponse à la détection de l'inclinaison devrait diminuer avec l'augmentation de la vitesse de roulis.

Compte tenu de l'abondante littérature montrant que la détection du mouvement s'améliore avec la présence d'informations visuelles [Benson et Brown, 1989; Benson et al., 1989; Huang et Young, 1981; Stewart, 1970], nous faisons l'hypothèse que la détection du mouvement et de l'inclinaison sera plus rapide en conditions yeux ouverts (présence d'informations visuelles) qu'en condition yeux fermés.

En revanche, considérant que la majorité des études sur la perception du mouvement n'ont pas rendu compte d'effet de la direction d'inclinaison sur la sensibilité de individus aux mouvement de roulis et de lacet [Clark et Stewart, 1970; Gundry, 1978; Okada et al., 1999; Otakeno et al., 2002], nous supposons

que la détection du mouvement et de l'inclinaison ne sera pas influencée de manière significative par la direction d'inclinaison.

Aucune étude ne s'est intéressée à notre connaissance au seuil de perception de la chute pour la raison essentielle que ce phénomène est principalement critique pour la simulation moto, contrairement à la simulation de conduite automobile ou de vol. Sachant qu'une vitesse d'inclinaison élevée peut déstabiliser l'équilibre critique du conducteur, nous supposons que les participants se sentiront de plus en plus fréquemment chuter avec l'augmentation de la vitesse angulaire. Toutefois, nous émettons l'hypothèse que la perception de la chute est principalement due à un changement d'orientation du corps trop important par rapport à la verticale gravitaire, qui est signalée à la fois par les organes otolithiques et les récepteurs somesthésiques. Ce changement d'orientation important n'étant pas compensé par la force centrifuge sur le simulateur, nous émettons ainsi l'hypothèse que les participants ressentiront une sensation de chute à partir d'un angle constant. Nous supposons donc que l'angle au moment de la perception de la chute sera constant quelle que soit la vitesse de roulis. A partir de la description établie ci-dessus des mécanismes (gravitaires) que nous supposons être à l'origine de la sensation de chute, nous ne nous attendons pas à obtenir un effet de la condition visuelle sur la perception de la chute. De même, comme pour les tâches de détection du mouvement et de l'inclinaison, une absence d'effet du côté d'inclinaison sur le seuil de perception de la chute ainsi que sur l'angle au moment de la perception de la chute, est attendue.

## 7.2 Méthode

### 7.2.1 Participants

Quinze motocyclistes (13 hommes et 2 femmes ; âge moyen = 33,9 ans, ET = 7,4 ans ; nombre moyen d'années de permis = 10,3 ans, ET = 7,9 ans ; nombre moyen de kilomètres par an = 14333 km/an, ET = 7914 km/an) ont participé à cette étude. Tous ont une vue normale ou corrigée à la normale.

### 7.2.2 Dispositif expérimental et tâche

Cette étude a été réalisée avec le simulateur moto dans sa version initiale (axe de rotation de roulis incliné de 17 degrés), avec un roulis physique maximum limité à 12,5 degrés. Cette étude visant à déterminer la sensibilité des participants au mouvement de roulis physique, seule la plate-forme a été utilisée pour la génération du roulis. L'environnement de simulation étant également dans sa version initiale (simulateur moto placé devant un écran), l'écran n'a pas été utilisé et aucune image n'a été projetée au cours de cette étude.

Assis en position de conduite (pieds sur les repose-pieds, mains sur le guidon) sur le simulateur placé face à l'écran, les participants ont réalisé deux tâches différentes. La première tâche consistait, au cours d'une même stimulation en roulis, à détecter le mouvement puis l'inclinaison. Les participants devaient indiquer, dans l'ordre et pour un même essai, le moment où ils percevaient tout mouvement provenant du simulateur, puis le moment où ils se sentaient inclinés. Les participants devaient donc donner deux réponses, une première réponse relative à la détection du mouvement et la seconde relative à la détection de l'inclinaison. Pour ce faire, il était spécifié aux participants qu'ils devaient signaler aussi rapidement que possible en appuyant sur l'avertisseur sonore lorsqu'ils détectaient le mouvement et sur le démarreur lorsqu'ils détectaient l'inclinaison.

La seconde tâche consistait en une tâche de perception de la chute. Les participants devaient ici

indiquer, lors de l'inclinaison en roulis, s'ils percevaient une sensation de chute (quelle que soit la nature de sa manifestation : déséquilibre, glissement sur la selle, retenue inhabituelle au guidon, repose-pieds ou réservoir). Il leur était demandé, comme précédemment, de répondre le plus rapidement possible, en appuyant cette fois sur l'avertisseur sonore et le démarreur en même temps (afin de s'assurer d'une réponse du fait des vitesses élevées d'inclinaison retenues ; pour les analyses, seule la première réponse a été utilisée). Les participants recevaient d'autre part la consigne de ne pas répondre s'ils ne percevaient pas de sensation de chute.

Pour chacune de ces tâches, il a été demandé aux participants de conserver les pouces en contact permanent avec les boutons utilisés pour répondre. Quelle que soit la tâche, chaque essai débutait avec le simulateur dans une position d'origine à 0 degré de roulis. Après deux secondes d'attente, le simulateur s'inclinait jusqu'à ce que le participant ait répondu ou jusqu'à son angle de roulis maximum en l'absence de réponse (tâche de perception de la chute). Une fois la réponse donnée ou le roulis maximum atteint, le simulateur maintenait l'angle de roulis instantané pendant une seconde puis se replaçait automatiquement dans sa position d'origine à une vitesse de 8 deg.s<sup>-1</sup>.

### 7.2.3 Plan expérimental

Pour chacune des deux tâches, ont été manipulés la vitesse d'inclinaison en roulis, le côté d'inclinaison et la condition visuelle (yeux ouverts vs yeux fermés).

En ce qui concerne la tâche de détection du mouvement et de détection de l'inclinaison, huit vitesses de roulis ont été utilisées (0,25, 0,5, 1, 2, 3, 4, 8 et 12 deg.s<sup>-1</sup>). Pour la tâche de perception de la chute, sept vitesses ont été utilisées (1, 2, 4, 8, 16, 32 et 48 deg.s<sup>-1</sup>). Ces vitesses de roulis ont été choisies en référence aux valeurs observées en situation réelle de conduite lors d'une expérience sur moto instrumentée (étude non publiée, interne au LEPSIS). Ces données ont permis d'observer des vitesses moyennes de roulis de 0,5 deg.s<sup>-1</sup> en ligne droite, de 2 à 6 deg.s<sup>-1</sup> en virage pour des vitesses de 40 km.h<sup>-1</sup>, et de 6 à 16 deg.s<sup>-1</sup> pour des manœuvres d'évitement réalisées avec une vitesse de passage respectivement de 20 et 40 km.h<sup>-1</sup>. Les vitesses de roulis manipulées dans cette étude ont en définitive été choisies de manière à conserver, pour la tâche de détection du mouvement et de détection de l'inclinaison, des vitesses angulaires inférieures, supérieures et autour du seuil théorique (2-3 deg.s<sup>-1</sup>) de perception du mouvement [Benson et al., 1989; Meiry, 1965]. Les vitesses retenues ont également été choisies de façon à proposer des vitesses angulaires communes entre les deux tâches (1, 2, 4 et 8 deg.s<sup>-1</sup>) ainsi que la vitesse de roulis maximale d'inclinaison de la plate-forme (48 deg.s<sup>-1</sup>).

Pour la tâche de détection du mouvement et de détection de l'inclinaison, le plan expérimental 8 vitesses (0,25, 0,5, 1, 2, 3, 4, 8 et 12 deg.s<sup>-1</sup>) x 2 côtés d'inclinaison (droite et gauche) x 2 conditions visuelles (yeux ouverts et yeux fermés) résultait en 32 conditions expérimentales différentes.

Pour la tâche de perception de la chute, le plan expérimental 7 vitesses (1, 2, 4, 8, 16, 32 et 48 deg.s<sup>-1</sup>) x 2 côtés d'inclinaison (droite et gauche) x 2 conditions visuelles (yeux ouverts et yeux fermés) résultait en 28 conditions expérimentales différentes.

### 7.2.4 Procédure

Une fois arrivés au laboratoire, les participants ont dans un premier temps pris connaissance des différentes informations relatives à l'expérience et à son déroulement avant de signer le formulaire de consentement. Ils ont ensuite complété un questionnaire informel portant sur leur pratique du deux-roues et sur leur technique de conduite en particulier lors de la prise de virage. Enfin, l'expérimentateur

leur a présenté le simulateur et ses différents constituants avant de leur expliquer le principe des différentes tâches à effectuer et de procéder à une session de familiarisation.

Au cours de cette session, les participants ont réalisé douze essais d'entraînement pour chacune des deux tâches, avec deux directions d'inclinaison et trois vitesses de roulis (2,5, 5 et 10 deg.s<sup>-1</sup> pour la détection du mouvement et de l'inclinaison et 20, 30 et 40 deg.s<sup>-1</sup> pour la perception de la chute). L'entraînement a été accompli dans la condition visuelle (yeux ouverts ou yeux fermés) par laquelle les participants ont débuté la session expérimentale. Au cours de cette session comme de l'expérience proprement dite, la pièce était éclairée, les participants portaient leur casque moto et ils étaient équipés d'un bandeau totalement occultant pour la passation de la condition yeux fermés.

Après s'être assuré que les détails relatifs à chaque tâche étaient clairs et compris par les participants, l'expérimentation débutait. Pour chacune des deux tâches, les participants ont réalisé 5 essais par condition expérimentale, soit 160 essais (répartis en blocs de 20 essais) pour la tâche de détection du mouvement et de détection de l'inclinaison, et 140 essais (répartis en blocs de 18 ou 17 essais) pour la tâche de perception de la chute. Ces essais ont été réalisés selon l'ordre suivant (figure 7.1). En premier lieu, les conditions visuelles ont été présentées de façon contrebalancée entre les participants. Ainsi, la moitié des participants a débuté par la condition yeux ouverts et la seconde moitié par la condition yeux fermés. Pour chacune de ces conditions, les deux tâches ont également été présentées de façon contrebalancée. Pour les participants débutant par la condition yeux ouverts, la moitié a effectué en premier la tâche de détection du mouvement et de l'inclinaison et l'autre moitié, la tâche de perception de la chute. L'ordre inverse a été utilisé pour les participants débutant par la condition yeux fermés. Cette procédure de présentation mixte des tâches a été préférée à une présentation classique afin 1) de minimiser les possibles effets d'interférence entre les conditions visuelles et 2) de présenter conjointement les stimulations courantes (*i.e.*, tâche de détection de l'inclinaison) et extrêmes (tâche de perception de la chute) liées à la conduite d'un deux-roues. Pour chacune des deux tâches, le côté d'inclinaison était également contrebalancé et présenté en 2 blocs successifs. Ces 2 blocs correspondaient à la réalisation des 5 essais pour chaque vitesse retenue ( $n = 40$  pour la tâche d'inclinaison, et  $n = 35$  pour la perception de la chute), ces essais étant présentés aléatoirement. Une pause de 3 min et une pause de 10 min ont été observées respectivement entre chaque bloc d'essais et entre les 2 conditions visuelles. La session complète a approximativement duré 1h30.

### 7.2.5 Analyse des données

Sur la base de l'étude bibliographique, la détection de mouvement est considérée comme un phénomène purement dynamique et donc fondé sur les caractéristiques cinématiques du stimulus, alors que l'inclinaison est un phénomène perçu à la fois par la cinématique (via les capteurs d'accélération, si l'intensité du stimulus le permet) et par l'angle (via les inclinomètres). Par conséquent, l'angle au moment de la réponse représente un indice peu pertinent pour rendre compte de la détection du mouvement, alors qu'il est communément utilisé pour exprimer le seuil de détection de l'inclinaison. Le seuil de détection du mouvement est quant à lui généralement exprimé soit en terme de vitesse, soit en terme d'accélération angulaire, selon les études.

Pour la tâche de détection du mouvement, la mesure a donc porté sur le temps de réponse, correspondant au temps écoulé entre le début du mouvement de roulis et la réponse du participant. Pour la tâche de détection de l'inclinaison, deux variables dépendantes ont été retenues. Les mesures ont porté, d'une part, sur le temps de réponse, défini comme ci-dessus, et d'autre part, sur l'angle d'inclinaison au moment de cette réponse.

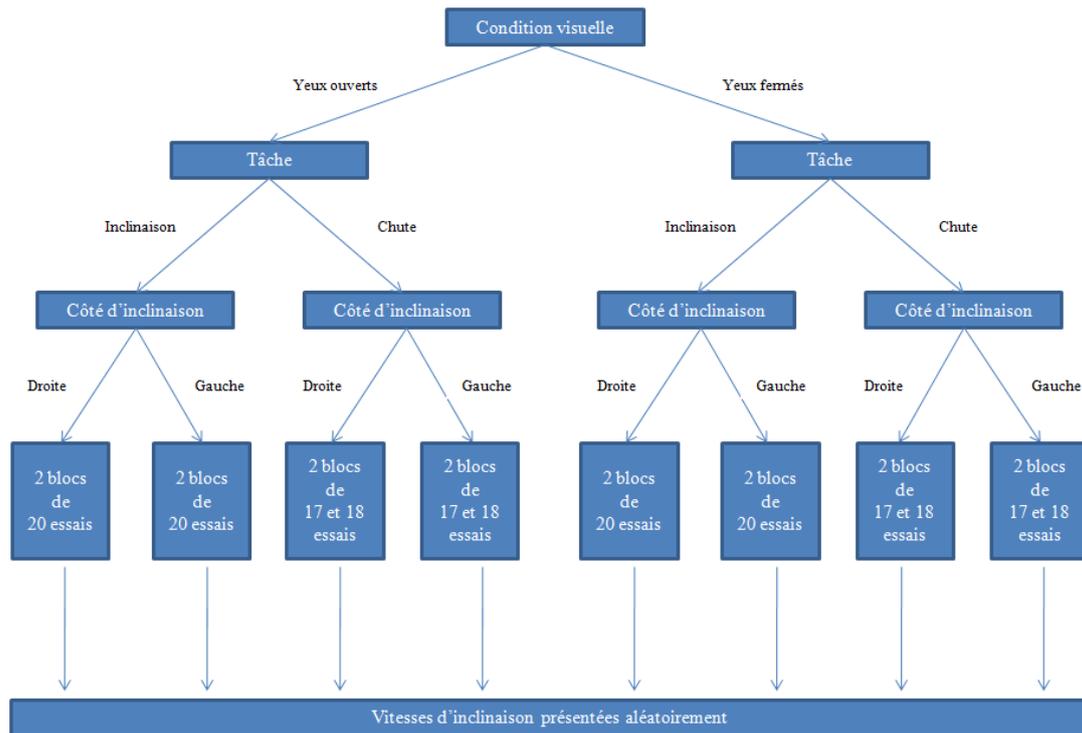


FIGURE 7.1 – Représentation schématique du plan expérimental de cette expérience.

Pour la tâche de perception de la chute, trois variables dépendantes ont été retenues. Dans cette tâche, les participants pouvaient soit percevoir la chute, auquel cas ils répondaient, soit ne pas percevoir la chute, auquel cas ils avaient pour consigne de ne pas répondre. L'ensemble des essais effectués n'a pas résulté en une réponse positive (*i.e.*, détection). Par conséquent, le seuil de perception de la chute a été déterminé à partir d'une fonction logistique dressée sur la base des réponses positives, *i.e.*, pourcentage de réponse de détection en fonction de la vitesse de roulis (pour une illustration, voir la figure 7.4). La fonction logistique suivante,

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)}}$$

, où  $x$  est la vitesse de roulis, a été utilisée pour déterminer la vitesse de roulis (argument  $\alpha$  de la fonction) à laquelle la transition entre percevoir et ne pas percevoir la chute s'opère (*i.e.*, seuil de transition correspondant à une perception de la chute dans 50 % des cas), ainsi que la pente de la courbe au point  $\alpha$  (argument  $\beta$  de la fonction). La valeur de cette pente renseigne sur la rapidité à laquelle s'effectue la transition entre ne pas percevoir et percevoir la chute : plus la pente est importante, plus la transition s'opère rapidement. Le signe renseigne quant à lui sur le sens de cette transition. Une pente positive indique que la probabilité de percevoir la chute augmente avec la vitesse de roulis alors qu'une pente négative indique que cette probabilité diminue avec l'augmentation de la vitesse de roulis. Enfin, l'angle d'inclinaison au moment de la réponse a également été mesuré.

Pour les tâches de détection du mouvement et de l'inclinaison, les différentes variables dépendantes ont été analysées à partir d'une analyse de variance (ANOVA) Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison x Condition visuelle. Pour la tâche de perception de la chute, les différentes variables dépendantes ont été analysées à partir d'un test  $t$  de Student. Le niveau de significativité a été fixé à 0.05 pour toutes les analyses statistiques. La taille de l'effet ( $\eta^2$ ) est également rapportée. Lorsque nécessaire, le test post-hoc

de Newman-Keuls a été utilisé afin de déterminer les différences significatives.

## 7.3 Résultats

Pour l'ensemble des tâches, l'ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison x Condition visuelle et le test  $t$  de Student n'ont révélé aucun effet principal ou d'interaction du facteur Côté d'inclinaison sur les différentes variables dépendantes retenues. Par conséquent, les analyses détaillées ci-dessous ont été conduites sur l'ensemble des essais sans distinction du côté d'inclinaison. Les données obtenues selon le côté d'inclinaison sont néanmoins présentées pour information pour chacune des tâches.

### 7.3.1 Détection du mouvement

Une ANOVA à mesures répétées 8 Vitesses de roulis x 2 Conditions visuelles sur le temps de réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(7, 98) = 73.58, p < .001, \eta^2 = .84$ , mais aucun effet principal ou d'interaction de la condition visuelle. Le test post-hoc sur l'effet principal de la vitesse de roulis a révélé une diminution significative du temps de réponse avec l'augmentation de la vitesse de roulis. Plus précisément, les temps de réponse aux vitesses 0,25, 0,5, 1, 2 et 3  $\text{deg.s}^{-1}$ , qui se différencient de façon significative entre eux, étaient supérieurs aux autres vitesses. En revanche, à partir de 4  $\text{deg.s}^{-1}$ , aucune différence significative n'est apparue entre les vitesses de roulis les plus élevées (4, 8 et 12  $\text{deg.s}^{-1}$ ). L'ensemble des données obtenues est présenté dans la figure 7.2.

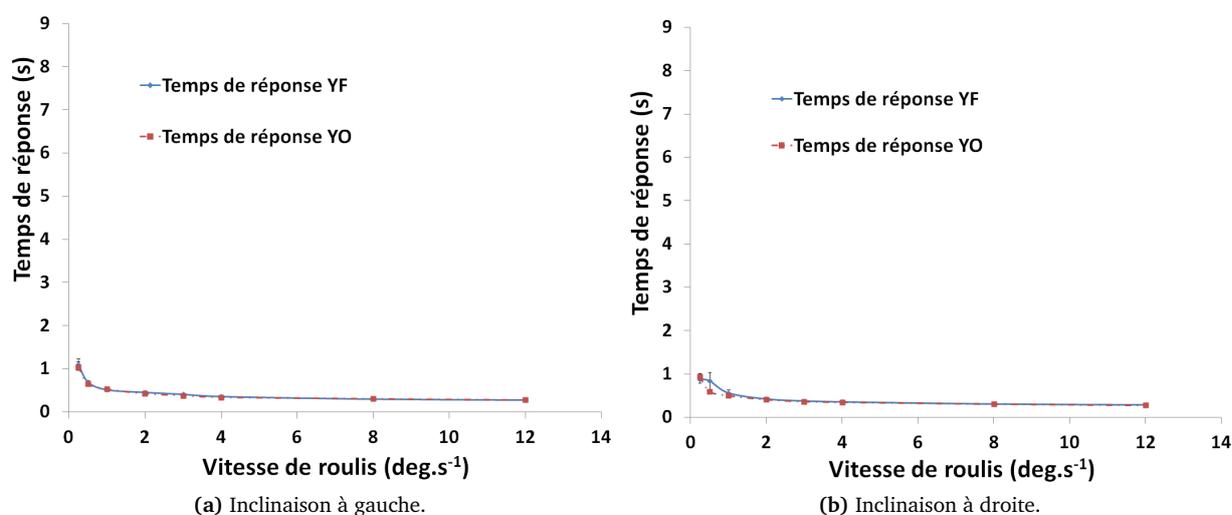


FIGURE 7.2 – Temps de réponse (s) en fonction de la condition visuelle (YF : Yeux Fermés - YO : Yeux Ouverts) et de la vitesse de roulis, obtenu pour chaque côté d'inclinaison dans la tâche de détection du mouvement.

### 7.3.2 Détection de l'inclinaison

L'ANOVA à mesures répétées 8 Vitesses de roulis x 2 Conditions visuelles sur le temps de réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(7, 98) = 96.65, p < .001, \eta^2 = .87$ . Un test post-hoc sur l'effet principal de la vitesse a indiqué une diminution significative du temps de réponse avec l'augmentation de la vitesse de roulis. Le temps de réponse aux vitesses les plus faibles (0,25, 0,5 et 1  $\text{deg.s}^{-1}$ ) était significativement supérieur aux autres vitesses. L'analyse a également mis en évidence l'existence

d'un plateau dans le temps de réponse à partir de 2  $\text{deg.s}^{-1}$ , le temps mis pour détecter l'inclinaison ne variant pas significativement entre 2 et 12  $\text{deg.s}^{-1}$  (figure 7.3). L'ANOVA a également révélé que l'effet principal de la condition visuelle approchait le seuil de significativité,  $F(1, 14) = 3.33, p = .08, \eta^2 = 0, 19$ , suggérant que les participants ont détecté l'inclinaison plus rapidement en condition yeux ouverts par comparaison à la condition yeux fermés. L'interaction entre la condition visuelle et la vitesse n'était pas significative ( $p > .10$ ).

L'ANOVA à mesures répétées 8 Vitesses de roulis x 2 Conditions visuelles sur l'angle d'inclinaison au moment de la réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(7, 98) = 92.63, p < .001, \eta^2 = .87$ , et de la condition visuelle,  $F(1, 14) = 4.85, p < .05, \eta^2 = .26$ . Pour la condition visuelle, les résultats ont montré que l'angle d'inclinaison au moment de la réponse était significativement plus faible en condition yeux ouverts ( $M = 3,07^\circ$  ;  $ET = 1,71^\circ$ ) comparé à la condition yeux fermés ( $M = 3,36^\circ$  ;  $ET = 1,88^\circ$ ). L'interaction entre la condition visuelle et la vitesse n'était pas significative ( $p > .10$ ). Le test post-hoc sur l'effet de la vitesse a révélé une absence de différence significative entre les vitesses allant de 0,25 à 1  $\text{deg.s}^{-1}$ , mais une augmentation, avec la vitesse de roulis, de l'angle d'inclinaison au moment de la réponse à partir de 2  $\text{deg.s}^{-1}$  (figure 7.3).

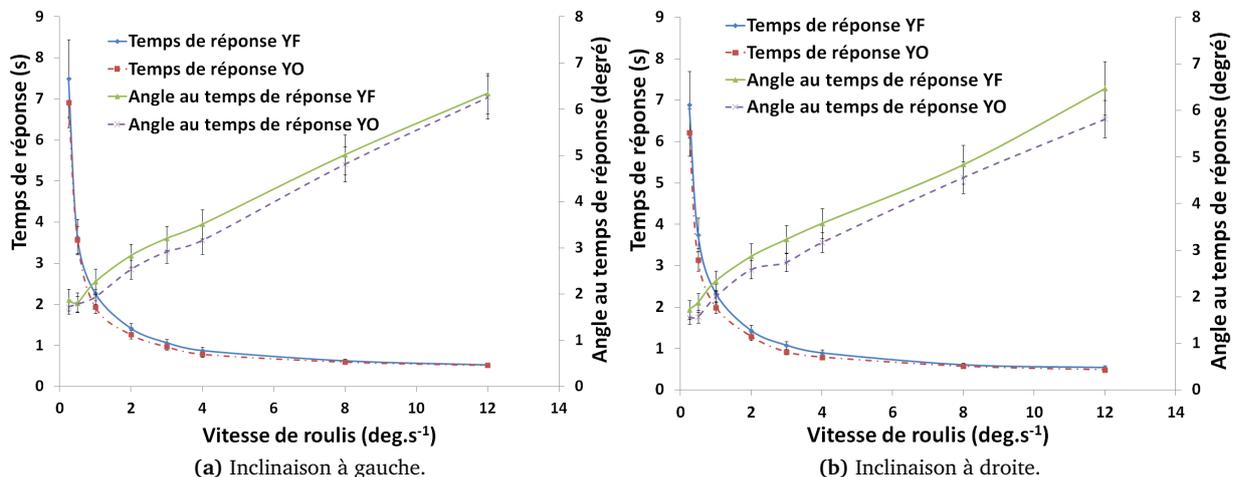


FIGURE 7.3 – Temps de réponse (s) et angle au temps de réponse (degré) en fonction de la condition visuelle (YF : Yeux Fermés - YO : Yeux Ouverts) et de la vitesse de roulis, obtenu pour chaque côté d'inclinaison dans la tâche de détection de l'inclinaison.

### 7.3.3 Perception de la chute

Une première représentation des résultats (pourcentage de réponse positive, *i.e.*, chute perçue, en fonction de la vitesse de roulis ; voir la figure 7.4) a permis de mettre en évidence différents patterns de réponse :

- Résultat principalement attendu, un groupe de participants ( $n=4$ ) a perçu une sensation de chute de plus en plus fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis. La régression logistique, réalisée pour chaque condition visuelle mais indépendamment de la direction de l'inclinaison, a mis en évidence pour ce groupe une transition entre ne pas percevoir et percevoir la chute pour une vitesse seuil de 15,14  $\text{deg.s}^{-1}$  ( $ET = 3,73 \text{ deg.s}^{-1}, r^2 = 0,94$ ). Ce résultat indique donc que, à partir d'une vitesse de roulis de 15,14  $\text{deg.s}^{-1}$  en moyenne, ces participants ont ressenti une sensation de chute dans 50 % des cas. L'analyse de régression logistique a d'autre part révélé, pour ce groupe,

une pente positive (pente de  $3,63 \text{ deg.s}^{-1}$  à la vitesse seuil ;  $ET = 3,61 \text{ deg.s}^{-1}$ ) compte tenu du pattern de réponse (groupe nommé « *transition positive* »). Afin de déterminer l'effet de la condition visuelle pour ce groupe, un test  $t$  de Student a été appliqué sur la vitesse seuil ainsi que sur la pente de la courbe à cette vitesse. Les résultats n'ont pas révélé d'effet de ce facteur que ce soit sur la vitesse seuil ( $t(3) = .65, p = .55$  ;  $M = 16,26$  et  $14,02 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $ET = 3,04$  et  $4,45 \text{ deg.s}^{-1}$ , respectivement, en condition yeux fermés et yeux ouverts) ou sur la pente à cette vitesse ( $t(3) = -.87, p = .45$  ;  $M = 2,94$  et  $4,34 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $ET = 2,08$  et  $4,97 \text{ deg.s}^{-1}$ , respectivement, en condition yeux fermés et yeux ouverts).

- Un second groupe de participants ( $n=5$ ) a montré un pattern de réponse opposé, la probabilité de percevoir une chute diminuant avec l'augmentation de la vitesse. La régression logistique a mis en évidence pour ce groupe une vitesse seuil de  $6,87 \text{ deg.s}^{-1}$  ( $ET = 3,67 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $r^2 = 0,98$ ) pour une pente de  $-1,78 \text{ deg.s}^{-1}$  à cette vitesse (groupe nommé « *transition négative* »). Ce résultat indique que ce groupe a ressenti une chute dans 50 % des cas jusqu'à une vitesse seuil de  $6,87 \text{ deg.s}^{-1}$ . Comme précédemment, un test  $t$  de Student a été appliqué sur la vitesse seuil ainsi que sur la pente à cette vitesse afin de déterminer l'effet de la condition visuelle. Une nouvelle fois, les résultats n'ont pas révélé d'effet de ce facteur (pour la vitesse seuil :  $t(3) = -.16, p = .88$  ;  $M = 6,77$  et  $6,97 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $ET = 4,15$  et  $4,46 \text{ deg.s}^{-1}$ , respectivement, en condition yeux fermés et yeux ouverts - pour la pente à cette vitesse :  $t(3) = -.07, p = .94$  ;  $M = -1,81$  et  $-1,75 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $ET = 1,96$  et  $0,89 \text{ deg.s}^{-1}$ , respectivement, en condition yeux fermés et yeux ouverts).
- Deux participants ont systématiquement ressenti la chute, quelle que soit la vitesse de roulis (groupe « *répond toujours* »).
- Un groupe de participants ( $n=4$ ), malgré quelques réponses positives (un participant n'a jamais répondu, les trois participants restants ont répondu respectivement 2 fois, 6 fois et 9 fois sur 140 essais), n'a pas ressenti de chute (groupe « *ne répond jamais* »).

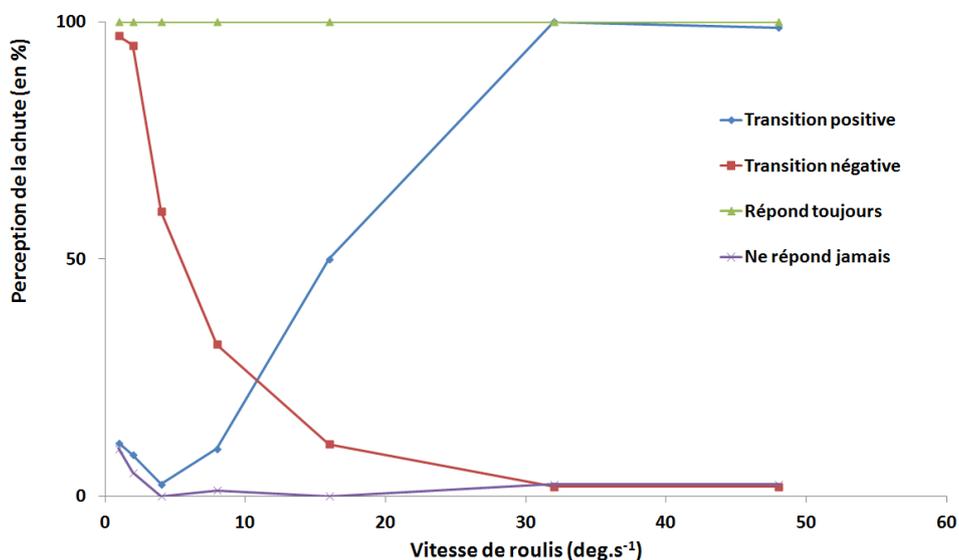


FIGURE 7.4 – Pourcentage de perception de la chute en fonction de la vitesse de roulis et des différents patterns de réponse obtenus.

Enfin, nous nous sommes intéressés à l'angle de roulis au moment de la réponse. Pour chaque sujet des groupes « *transition positive* » et « *transition négative* », nous avons calculé l'angle de roulis « seuil » correspondant à la vitesse de transition (au .50) déterminée par la fonction logistique. A cette fin,

une fonction logarithmique a été dressée à partir des valeurs d'angles de roulis obtenues pour chaque réponse donnée en fonction de la vitesse d'inclinaison (voir figure 7.5 et 7.6). L'angle de roulis « seuil » est alors calculé à partir de l'équation de la régression et de la vitesse de transition seuil déterminée précédemment par la fonction logistique (le .50).

Pour ces groupes « transition positive » et « transition négative », un test  $t$  de Student a été appliqué sur l'angle de roulis seuil afin de déterminer l'effet de la condition visuelle. Pour le groupe « transition positive », les résultats n'ont pas révélé d'effet de ce facteur sur l'angle de roulis seuil ( $t(3) = .40, p = .72$ ;  $M = 8,34$  et  $8,68^\circ$ ,  $ET = 3,66$  et  $2,35^\circ$ , respectivement, en condition yeux fermés et yeux ouverts). De manière similaire, pour le groupe « transition négative », les résultats n'ont pas non plus révélé d'effet de ce facteur ( $t(3) = .24, p = .82$ ;  $M = 11,94$  et  $11,86^\circ$ ,  $ET = 0,56$  et  $0,96^\circ$ , respectivement, en condition yeux fermés et yeux ouverts).

L'ensemble des données obtenues est présenté dans les figures 7.5 et 7.6, respectivement, pour les groupes « transition positive » et « transition négative », et dans le tableau 7.1, pour le groupe « répond toujours ».

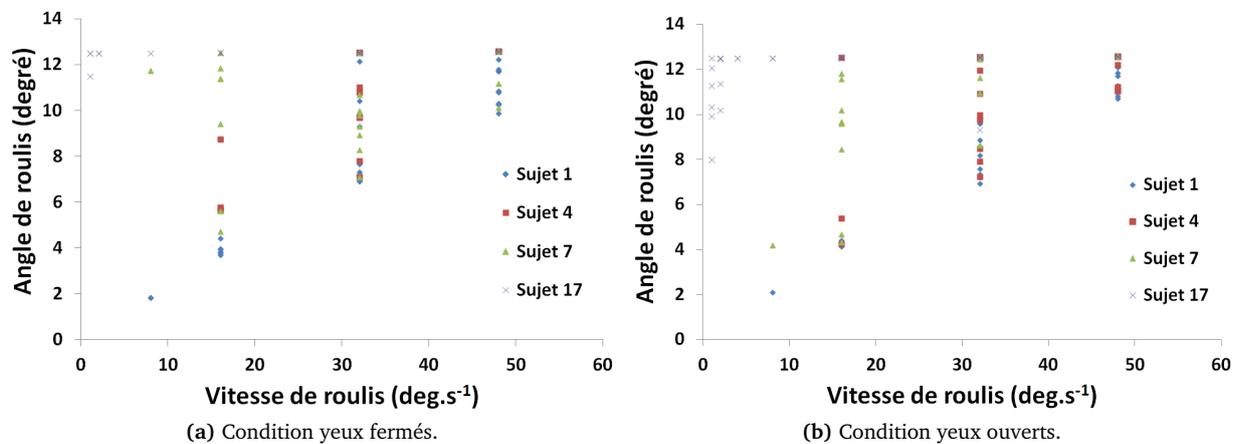


FIGURE 7.5 – Angle au moment de la réponse (degré) en fonction de la vitesse de roulis obtenu pour le groupe « transition positive » dans la tâche de perception de la chute.

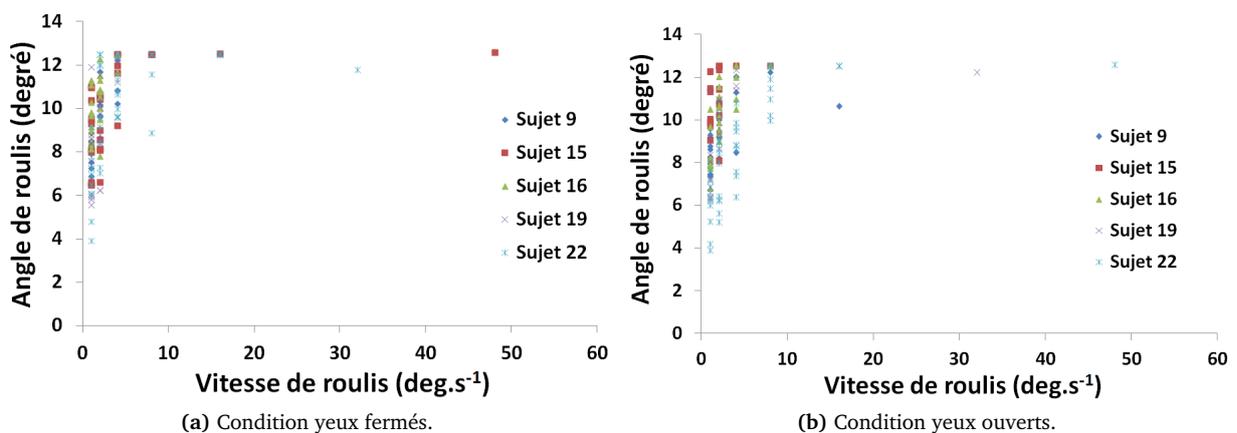


FIGURE 7.6 – Angle au moment de la réponse (degré) en fonction de la vitesse de roulis, obtenu pour le groupe « transition négative » dans la tâche de perception de la chute.

TABLE 7.1 – Angle au moment de la réponse (degré) en fonction de la vitesse de roulis et de la condition visuelle (YF : Yeux Fermés - YO : Yeux Ouverts), obtenu pour le groupe « répond toujours » dans la tâche de perception de la chute.

Groupe « répond toujours »	Vitesses de roulis ( deg.s <sup>-1</sup> )							
		1	2	4	8	16	32	48
Sujet 1	YF	7,5	9,6	11,7	12,5	12,5	12,5	12,5
	YO	8,2	9,6	12,0	12,5	12,5	12,5	12,5
Sujet 2	YF	5,9	8,2	10,1	12,5	12,5	12,5	12,5
	YO	6,1	7,6	9,9	12,2	12,5	12,5	12,5

## 7.4 Discussion

L'objectif de cette étude était de s'intéresser à la sensibilité des conducteurs de moto au mouvement de roulis sur simulateur en déterminant les seuils de détection du mouvement et de détection de l'inclinaison sans ressenti de chute. Nous avons, de plus, exploré comment certains facteurs, tels que la vitesse d'inclinaison et la direction de l'inclinaison ou encore la présence d'informations visuelles (via la condition visuelle), influencent la détection.

D'une façon générale, les résultats n'ont indiqué aucun effet de la direction d'inclinaison que ce soit sur la perception du mouvement, de l'inclinaison ou de la chute. Cette absence d'effet est en accord avec les résultats des études antérieures s'intéressant à la perception du mouvement ou de l'inclinaison dans les simulateurs de vol qui n'ont montré aucun effet du côté d'inclinaison sur les seuils de détection [Benson et Brown, 1989; Gundry, 1978; Okada et al., 1999; Otakeno et al., 2002]. Les résultats ont en revanche indiqué un effet robuste de la vitesse de roulis sur les trois seuils de détection investigués. Enfin, alors que les résultats ont mis en évidence un effet de la condition visuelle dans la tâche de détection de l'inclinaison, aucune influence de ce facteur n'a été révélée lors des tâches de détection du mouvement et de la perception de la chute.

### Détection du mouvement

Les résultats relatifs à la détection du mouvement ont indiqué un effet de la vitesse de roulis sur les réponses des participants : plus la vitesse de roulis augmente, plus le temps de détection du mouvement diminue. Nos résultats semblent également indiquer que cette détection du mouvement atteint un plateau (asymptote) à partir de la vitesse de 4 deg.s<sup>-1</sup>, le temps mis pour détecter le mouvement ne se différenciant plus de façon significative au-delà de cette vitesse. Enfin, les résultats n'indiquent aucun effet significatif de la condition visuelle sur le temps de réponse à la détection du mouvement. L'effet de la vitesse de roulis et l'absence d'effet de la condition visuelle sont discutés séparément dans les paragraphes suivants.

#### *Effet de la vitesse de roulis*

Ce résultat suit la loi générale, de Piéron, qui modélise la relation entre le temps de réponse à un stimulus et l'intensité de ce dernier. Le temps de réponse diminue ainsi comme une fonction de puissance de l'intensité de la stimulation (voir figure 7.7). Plusieurs études rendent compte d'une relation similaire entre le temps de réponse et l'intensité du stimulus, qu'il soit exprimé en termes de vitesse ou accélération angulaire [Clark, 1967; Gundry, 1978; Meiry, 1965]. Par ailleurs, alors qu'Heerspink et al. [2005] mettent en évidence que, pour de hautes fréquences, le seuil de détection des canaux semi-circulaires

est indépendant de la fréquence de la vitesse angulaire du stimulus, il est également rapporté dans la littérature que les canaux semi-circulaires sont les principaux responsables de la détection du mouvement pour des hautes fréquences de stimulus (même s'ils répondent également au stimulus à de faibles fréquences mais dans une moindre mesure ; Huang et Young, 1988). Les seuils de détection indiqués dans la littérature sont généralement plus faibles à haute fréquence qu'à basse fréquence, reflétant ainsi les caractéristiques haute fréquence des canaux semi-circulaires. Le temps mis pour détecter l'inclinaison est en conséquence plus rapide [Gundry, 1978] et tend au fur et à mesure à refléter simplement le temps de réaction moyen humain qui se situe autour de 300-400 ms pour la perception du mouvement [Barnett-Cowan et Harris, 2009; Gundry, 1978].

De plus, nous avons vu au travers des données issues de la centrale inertielle (voir section 6.2.2), qu'à partir de la vitesse de roulis de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$  le profil de mouvement de roulis produit par la plate-forme mobile indiquait clairement un pic d'accélération angulaire en début de rotation d'approximativement  $10 \text{ deg.s}^{-2}$ , avant de décroître et devenir constante pour une valeur comprise au niveau du bruit de mesure ( $\pm 5 \text{ deg.s}^{-2}$ ). Sur simulateur de vol, il est rapporté dans la littérature des valeurs de seuils des canaux semi-circulaires variant de  $0,2$  à  $1,6 \text{ deg.s}^{-2}$  en fonction de la fréquence du stimulus [Heerspink et al., 2005]. Les valeurs obtenues à partir de la centrale inertielle indiquent donc une sollicitation des canaux semi-circulaires de manière certaine dès  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ . Par conséquent, bien que la contribution des canaux semi-circulaires ne puisse être négligée et apparaisse avant la vitesse de  $4 \text{ deg.s}^{-1}$  (le temps de réponse ne se différenciant plus significativement au-delà de cette vitesse), il apparaît qu'aux faibles fréquences de stimulus (vitesse angulaire) la perception du mouvement soit détectée principalement par les organes otolithiques [Huang et Young, 1988; Okada et al., 1999] et les récepteurs somesthésiques [Mallery et al., 2010] expliquant ainsi un temps de détection plus long. Il est à noter qu'en raison de l'éloignement de l'axe de rotation de la tête du conducteur, les organes otolithiques répondent également à une accélération latérale tangentielle qui est détectée de manière certaine dès la vitesse de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$  dans notre étude. Toutefois, les participants déclarent en fin d'expérience avoir répondu à la détection du mouvement en raison principalement des vibrations émises par les vérins lors de l'inclinaison du simulateur, suggérant ainsi la sollicitation effective des récepteurs somesthésiques pour la détection du mouvement.

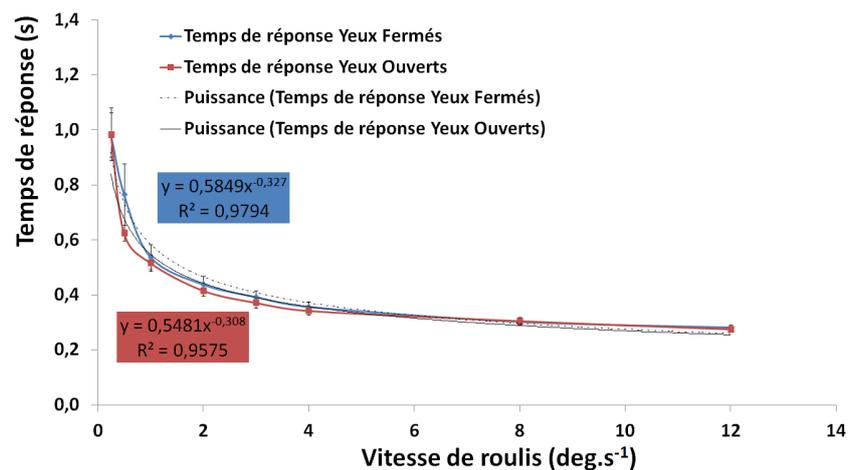


FIGURE 7.7 – Temps de détection du mouvement en fonction de la vitesse de roulis et de la condition visuelle. Pour chacune de ces conditions, est présentée l'équation de la fonction puissance ainsi que le  $r^2$  associé : l'encadré bleu représente l'équation et le  $r^2$  pour la condition Yeux Fermés, alors que l'encadré rouge expose ceux obtenus pour la condition Yeux Ouverts.

### ***Absence d'effet de la condition visuelle***

Nos résultats ne montrent aucun effet de la condition visuelle sur le temps de détection du mouvement, quelle que soit la vitesse de roulis. Or, ce résultat était attendu pour deux raisons. Tout d'abord, plusieurs études ont indiqué une augmentation de la sensibilité des individus à la perception du mouvement lors de la présence d'informations visuelles [Benson et Brown, 1989; Benson et al., 1989; Clark, 1967; Huang et Young, 1981]. Deuxièmement, il est reconnu que la vision, en particulier périphérique (impliquée dans la détection de mouvement), est plus sensible aux basses vitesses qu'aux hautes vitesses, contrairement aux informations canales. Par conséquent, un effet de la condition visuelle, avec une diminution du temps de réponse aux basses vitesses en condition yeux ouverts en comparaison à la condition yeux fermés, était attendu.

Selon différentes études, la diminution du seuil de détection de mouvement lors de la présence d'informations visuelles est due principalement à l'illusion oculogyre produite [Benson et Brown, 1989; Benson et al., 1989; Clark, 1967; Huang et Young, 1981]. L'illusion oculogyre se définit par le mouvement apparent de la cible visuelle (e.g., spot lumineux dans un environnement sans lumière) perçu avant son propre mouvement, dans un environnement sans lumière [Clark, 1967]. Les participants apprennent ainsi à percevoir la rotation de leur corps au début de l'illusion oculogyre, le seuil de détection étant par conséquent plus faible qu'en environnement privé de sources lumineuses [Huang et Young, 1981]. Or, l'environnement visuel présenté dans notre étude ne permettait pas la production d'une illusion oculogyre puisque les participants étaient placés dans un environnement éclairé sans cibles lumineuses. Il est également suggéré que le niveau de vigilance induit par la présence de sources lumineuses pourrait constituer une des raisons du plus faible seuil de détection de mouvement associé à la présence d'informations visuelles [Huang et Young, 1981]. Ces différences méthodologiques pourraient expliquer l'absence d'effet de la condition visuelle.

Toutefois, l'influence de la condition visuelle a été étudiée essentiellement sur le seuil de détection du mouvement de lacet [Benson et Brown, 1989; Benson et al., 1989; Clark, 1967; Huang et Young, 1981], qui constitue une rotation autour de l'axe vertical alors que le mouvement de roulis implique une rotation autour de l'axe horizontal. Une seule étude à notre connaissance [Gundry, 1978] a étudié l'influence de la présence d'une cible visuelle lumineuse sur la détection du mouvement de roulis. Cette étude a mis en évidence des résultats mitigés, la présence d'une cible visuelle n'ayant pas d'effet systématique sur la capacité des sujets à détecter le mouvement de roulis. Gundry [1978] suggère que les participants se sont basés principalement sur les informations vestibulaires et somesthésiques pour détecter le mouvement de roulis. Les résultats de notre présente étude vont dans le sens de ceux établis par Gundry [1978].

Par ailleurs, nous avons pu voir au chapitre 2 (section 2.5), que la contribution des différentes informations sensorielles disponibles pour générer une perception unifiée est fonction du poids qui leur est assigné (qui est proportionnel à la fiabilité de l'information). Nos résultats suggèrent donc que le poids assigné aux informations visuelles est moins important que celui assigné aux informations vestibulaires et somesthésiques pour la détection du mouvement de roulis. Cette interprétation pourrait être confirmée par une analyse complémentaire portant sur l'identification des référentiels spatiaux privilégiés par les participants, avec l'hypothèse sous-jacente que les conducteurs de deux-roues motorisé seraient majoritairement sensibles aux informations gravitaires, par comparaison aux informations visuelles.

### **Détection de l'inclinaison**

Les résultats relatifs à la tâche de détection de l'inclinaison ont montré un angle moyen minimum de détection de 1,72 degré ( $\pm 0,65$  degré). De plus, un effet robuste de la vitesse de roulis a également

été mis en évidence. Plus la vitesse de roulis augmente, plus le temps de réponse diminue et plus l'angle au moment de la réponse augmente. Toutefois, les résultats ont souligné l'apparition d'un plateau à partir de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ , le temps de réponse ne diminuant plus de manière significative au-delà de cette vitesse. En revanche, les résultats ont montré que l'angle au moment de la réponse augmente de manière significative à partir de cette vitesse de roulis. En deçà de cette vitesse de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ , l'angle au moment de la réponse n'apparaît pas augmenter significativement. Enfin, la tâche de détection de l'inclinaison a mis en évidence un effet la condition visuelle sur l'angle au moment de la réponse. Chacun de ces résultats est discuté séparément.

### ***Angle moyen minimum de détection de 1,72 degré***

Cet angle est en adéquation avec les angles rapportés par Gundry [1978], Groen et al. [1999], Otakeno et al. [2002], ou encore indiqué dans la revue de littérature réalisée par Young [1984]. Cet angle est toutefois largement inférieur à celui indiqué par Bringoux et al. [2002] qui ont mis en évidence un angle minimum de détection de l'inclinaison en roulis de 5 degrés. Une explication possible à cet angle important mis en évidence par Bringoux et al. [2002] peut tenir au fait que les mouvements des participants étaient restreints par l'utilisation de harnais. Bringoux et al. [2002] attribua la détection de l'inclinaison essentiellement aux informations somesthésiques, Gundry [1978] a montré qu'une restriction des mouvements réduisait la contribution de ces informations et diminuait la sensibilité des participants aux rotations à basses vitesses. Parmi les études citées précédemment, on peut noter celle réalisée par Otakeno et al. [2002] qui constitue l'unique étude à notre connaissance qui s'est intéressée au seuil de détection de l'inclinaison sur simulateur. Otakeno et al. [2002] ont étudié l'influence de différentes scènes visuelles (représentant un paysage de jour, de nuit ou un écran blanc sans projection visuelle) sur le seuil (en angle) de détection de l'inclinaison chez des pilotes et non pilotes sur le simulateur ASDD (Advanced Spatial Disorientation Demonstrator, School of Aerospace Medicine USAF and Air Force Research Laboratory, Texas, Etats-Unis). Leur étude a mis en évidence un seuil moyen de détection de l'inclinaison en roulis de 2 degrés, quelle que soit la condition visuelle. Bien que la stimulation sensorielle sur simulateur moto diffère sensiblement de celle produite sur simulateur de désorientation spatiale (e.g., production de force centrifuge jusqu'à 2,2 g), l'angle minimum identifié dans cette étude corrobore la valeur du seuil indiquée par Otakeno et al. [2002] et complète les données disponibles sur la sensibilité au mouvement de roulis.

### ***Effet robuste de la vitesse de roulis sur le temps de réponse et l'angle au moment de la réponse***

Les résultats ont mis en évidence une diminution du temps de réponse mais une augmentation de l'angle au moment de cette réponse avec l'augmentation de la vitesse. La détection de l'inclinaison est considérée comme un phénomène quasi-statique assuré par les organes otolithiques qui répondent au changement d'orientation du corps par rapport à la verticale gravitaire, lorsque ce changement d'orientation dépasse une certaine valeur seuil. En effet, l'ensemble des études s'intéressant à la détection de l'inclinaison ont eu recours à une seule vitesse de roulis, fixée sous le seuil de détection théorique des canaux semi-circulaires [Bisdorff et al., 1996; Bringoux et al., 2000, 2002; Otakeno et al., 2002]. Avec l'augmentation de la vitesse de roulis et la mise en jeu des organes otolithiques et des canaux semi-circulaires, la valeur seuil est atteinte plus rapidement, expliquant une détection plus rapide de l'inclinaison.

Il est reconnu qu'aux hautes vitesses ce sont principalement les canaux semi-circulaires qui assurent la détection, les organes otolithiques étant plutôt sensibles à basses vitesses [Benson et al., 1989]. Bien

que les canaux semi-circulaires soient sollicités dès la vitesse de roulis de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$  (voir section 6.2.2), nos résultats suggèrent que la contribution des canaux n'apparaisse comme essentielle qu'à partir de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ . A cette vitesse, le temps de réponse ne diminue plus de manière significative. Les participants semblent alors répondre à la détection en s'appuyant principalement sur la cinématique du mouvement (détectée par les canaux semi-circulaires) et non sur le changement de position par rapport à la verticale gravitaire. Le temps de réponse se rapproche ainsi du temps mis pour détecter du mouvement. En effet, la différence entre ces deux temps de détection diminue au fur et à mesure que la vitesse de roulis augmente (de  $0,9 \text{ s}$  à  $0,2 \text{ s}$  de différence entre les deux détections pour les vitesses de  $2$  et de  $12 \text{ deg.s}^{-1}$ , respectivement). Par ailleurs, la diminution du temps de réponse est conditionnée (limitée) au temps de réaction humain minimum. A partir d'une certaine vitesse, il semble ainsi difficile pour les participants de distinguer la détection de mouvement de celle de l'inclinaison en raison de leur rapprochement temporel, les canaux semi-circulaires ne répondant qu'à une certaine intensité de stimulus et non à un changement d'orientation par rapport à la gravité.

A partir de cette même vitesse de roulis de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ , les résultats ont mis en évidence une augmentation de l'angle obtenu au moment de la détection. Avant cette vitesse, l'angle au moment de la réponse est constant suggérant que les participants s'appuient effectivement sur les organes otolithiques pour détecter un changement d'orientation par rapport à la gravité, même si les canaux semi-circulaires détectent une accélération angulaire à ces basses vitesses. Toutefois, comme le temps de réponse ne diminue plus de façon significative avec l'augmentation de la vitesse de roulis pour conserver un angle de détection constant (en raison de la limitation intrinsèque du temps de réaction humain), l'angle au moment de la réponse augmente de manière mécanique à partir de la vitesse de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ . Cependant, on peut noter que plusieurs travaux ont indiqué que la perception de l'orientation dans des conditions quasi-statiques était assurée principalement par les informations somesthésiques plutôt que par les informations otolithiques [Bringoux et al., 2000, 2002, 2003; Janssen et al., 2011; Teasdale et al., 1999]. Nos résultats ne nous permettent pas de différencier le poids de la contribution des informations somesthésiques de celui des organes otolithiques pour la détection de l'inclinaison. Cette différenciation nécessiterait une manipulation des informations somesthésiques durant l'expérience.

### ***Effet de la condition visuelle sur l'angle au moment de la réponse.***

Notre étude a également mis en évidence le fait que les participants détectent significativement plus tôt qu'ils sont inclinés en condition yeux ouverts (angle moyen de  $3,07$  degrés) par comparaison à la condition yeux fermés (angle moyen de  $3,36$  degrés). Cet effet n'a en revanche pas été mis en évidence sur le temps de réponse bien que les résultats indiquent une tendance similaire. Une possible explication à cette absence d'effet sur le temps de réponse peut être liée à la variabilité qui est plus importante sur le temps de réponse en comparaison à la variabilité existante au niveau de l'angle.

Bien que l'influence de la condition visuelle ait souvent été étudiée et rapportée dans la littérature sur la détection du mouvement, en particulier du lacet [Benson et Brown, 1989; Benson et al., 1989; Huang et Young, 1981; Clark, 1967; Stewart, 1970], seul Otakeno et al. [2002] ont étudié, sur simulateur de désorientation spatial, l'effet de ce facteur sur la détection de l'inclinaison en roulis. Leur étude n'a cependant pas indiqué d'effet de la condition visuelle sur l'angle au moment de la détection. Otakeno et al. [2002] expliquent l'absence d'effet par l'utilisation de scènes visuelles ne représentant pas de manière réaliste le monde réel, précisant que les scènes utilisées étaient basiques au niveau du contenu textural et que leur niveau de luminance ( $1,3 \text{ cd.m}^{-2}$  au maximum) était très inférieur à celui du monde réel. De ce point de vue, les conditions expérimentales testées dans notre étude se rapprochent plus de celles

étudiées dans les études dédiées à la détection du mouvement (comparaison entre une condition yeux ouverts et une condition yeux fermés). Comme nous l'avons indiqué pour la détection du mouvement, bien que la majorité de ces études expliquent leur résultat par la production de l'illusion oculogyre, d'autres ont également montré qu'un effet similaire de la condition visuelle pouvait être obtenu sans production de cette illusion [Marshall, 1967]. Notre étude corrobore ce résultat mis en évidence par [Marshall, 1967]. Par conséquent, et contrairement à la tâche de détection du mouvement, il semble donc que les individus utilisent les informations visuelles pour percevoir et préciser leur orientation spatiale, et notamment leur inclinaison.

En résumé, nos résultats suggèrent que les stratégies de commande devraient intégrer une vitesse de roulis minimal de  $4 \text{ deg.s}^{-1}$  pour qu'un mouvement de la moto soit ressenti immédiatement pendant la conduite, mais une vitesse de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$  et un angle minimum de  $1,72$  degré pour permettre un ressenti d'inclinaison en situation de conduite. Ces valeurs sont néanmoins à enrichir de données complémentaires, en particulier dans le cas d'une restitution visuelle (fournissant des informations liées à la vection ou à l'inclinaison dans le cas de l'introduction d'un « roulis visuel »), le rôle de ce facteur ayant été souligné à plusieurs reprises.

## Perception de la chute

Concernant les réponses relatives à la perception de la chute, la fonction logistique suggère que la probabilité la plus faible de perception de la chute (et qui concerne le plus grand nombre de participants, soit 13 sur 15, correspondant aux groupes « transition positive », « transition négative » et « ne répond jamais ») se situe entre des vitesses de roulis de  $6,87 \text{ deg.s}^{-1}$  (vitesse à laquelle la probabilité de détecter passe sous le seuil de .50 pour le groupe « transition négative ») et  $15,14 \text{ deg.s}^{-1}$  (vitesse jusqu'à laquelle la probabilité de détecter reste sous le seuil de .50 pour le groupe « transition positive »).

Les résultats n'ont mis en évidence aucun effet de la condition visuelle que ce soit sur le seuil de perception de la chute ou sur l'angle au moment du ressenti de la chute. Ce résultat suggère que contrairement à la tâche de détection de l'inclinaison, les participants s'appuient essentiellement sur les informations vestibulaires et somesthésiques pour percevoir la chute, quelle que soit la vitesse de roulis. À partir des différents groupes mis en évidence par la fonction logistique, la sensation de chute semble provenir soit d'un déséquilibre postural dû à une vitesse de roulis trop élevée (détectée par les canaux semi-circulaires), d'une accélération latérale trop importante (stimulant les organes otolithiques) ou à un changement d'orientation du corps trop important par rapport à la gravité (détecté par les organes otolithiques et les récepteurs somesthésiques).

La fonction logistique, en dégageant quatre modalités différentes de réponse, a mis en évidence une forte hétérogénéité dans le ressenti de la chute. Un groupe de participants a ressenti qu'ils tombaient à toutes les vitesses, un autre groupe a ressenti qu'ils tombaient seulement sur quelques essais (3,5 essais en moyenne sur 140, soit de 0 à 9 essais sur 140), alors que pour les participants restants, certains d'entre eux ont perçu une sensation de chute de plus en plus fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis alors que d'autres ont ressenti le plus fréquemment une chute aux vitesses les plus faibles. Différentes hypothèses sont proposées pour expliquer cette importante hétérogénéité. Parmi ces hypothèses, nous présentons tout d'abord les hypothèses que nous avons pu tester à partir des données recueillies dans cette étude, puis nous aborderons d'autres hypothèses que nous tenterons de vérifier ultérieurement (les données nécessaires pour tester ces hypothèses n'ayant pas été recueillies dans cette étude).

## Hypothèses testées

En premier lieu, les différents patterns de réponse obtenus peuvent s'expliquer en partie par le niveau d'expérience (*i.e.*, nombre d'années de permis moto). En effet, nous pouvons supposer que les conducteurs expérimentés, ayant été confrontés plus souvent à des situations de déséquilibre que les conducteurs novices, sont les personnes les plus à même de gérer ces situations de potentiels déséquilibres (en reconnaissant par exemple que les mouvements, même extrêmes, du simulateur, ne correspondent pas aux situations de chute ou de presque chute en moto). Nous supposons donc que plus le conducteur est expérimenté, moins il sera susceptible de ressentir une sensation de chute. Le groupe « ne répond jamais » serait ainsi composé des participants ayant le plus d'expérience. A l'inverse, on peut émettre l'hypothèse que les participants ayant le moins d'expérience de conduite ressentiront plus fréquemment une sensation de chute. Ces individus composeraient ainsi principalement les groupes qui répondent se sentir chuter : les groupes « répond toujours », « transition positive » et « transition négative ». L'ANOVA réalisée sur le nombre moyen d'années de permis moto avec comme facteur interindividuel le groupe mis en évidence par la fonction logistique, a révélé un effet principal du groupe sur le nombre d'années de permis moto,  $F(3, 11) = 3.68, p < .05, \eta^2 = .50$ . Le test post-hoc (Newman-Keuls) a indiqué que le nombre d'années de permis du groupe « ne répond jamais » était supérieur à celui des groupes « transition négative » et « répond toujours ». En revanche, aucune différence n'a été révélée entre le groupe « ne répond jamais » et le groupe « transition positive ». Cette absence de différence peut provenir de la grande variabilité interindividuelle de ce dernier groupe (voir tableau 7.2). Aucune autre différence significative n'a été révélée par l'analyse. Ces résultats vont ainsi dans le sens de nos hypothèses. Il semble que les participants du groupe « ne répond jamais » sont donc les conducteurs les plus expérimentés alors que les trois autres groupes « répond toujours », « transition positive » et « transition négative » sont formés de participants moins expérimentés.

TABLE 7.2 – Nombre moyen d'années de permis moto selon le pattern de réponse à la chute représenté par les quatre groupes mis en évidence par la fonction logistique.

	Groupe			
	«Ne répond jamais»	«Répond toujours»	«Transition positive»	«Transition négative»
Moyenne	18,8	9,5	9,3	4,8
Ecart type	4,5	9,2	9,3	2,9

En parallèle, il est reconnu que selon le type de moto conduite (routière, roadster, sportive ou custom) les individus sont plus ou moins habitués aux accélérations élevées ou à une mise sur l'angle importante. En effet, les conducteurs de motos sportives sont supposés être habitués aux accélérations rapides et aux mises sur l'angle à la fois rapides et importantes en comparaison aux conducteurs de motos routières, appelée également Grand Tourisme (GT), qui privilégient le confort de conduite en maintenant une position plus proche de la verticale. Par ailleurs, alors qu'une moto roadster implique une conduite intermédiaire entre la conduite sur moto sportive et routière, une moto custom constitue le type de moto impliquant des prises d'angle moins élevées en raison des caractéristiques propres à ces motos qui impliquent une position de conduite pieds à l'avant. Nous supposons donc que les conducteurs de motos sportives sont moins susceptibles de ressentir une sensation de chute en comparaison aux conducteurs de motos routières et roadsters. En revanche, les conducteurs de customs qui ne sont pas coutumiers des inclinaisons de roulis importantes ou rapides peuvent être perturbés sur simulateur lors de telles inclinaisons. Nous émettons ainsi l'hypothèse que les participants du groupe « ne répond jamais » sont majoritairement des conducteurs de motos sportives. A l'inverse, nous supposons que les participants du groupe « répond

toujours » sont essentiellement des conducteurs de motos customs, alors que les participants des groupes « transition positive » et « transition négative » sont principalement des conducteurs de motos routières ou roadsters. D'un point de vue descriptif, il apparaît que la majorité des participants de cette étude (11 sur les 15 participants) conduisaient une moto sportive, les quatre groupes étant composés pour moitié de conducteurs de motos sportives. Notre hypothèse ne peut donc être validée. Il semble donc que le type de moto conduite ne soit pas un facteur explicatif des différents patterns de réponse à la chute existants.

### *Hypothèses que nous testerons ultérieurement*

Les différents patterns de réponse à la chute peuvent également trouver leur origine dans l'expérience des participants vis-à-vis de la chute en moto. Nous pouvons en effet supposer que les motocyclistes qui ont chuté par le passé soient moins enclins à ressentir une sensation de chute sur simulateur. Les participants du groupe « ne répond jamais » seraient des motocyclistes ayant déjà chuté à plusieurs reprises en situation réelle. Cette relation s'expliquerait par la différence entre les conditions rencontrées lors des divers épisodes de chute en conduite réelle et la situation proposée sur simulateur (situation passive, angle de roulis maximum limité, accélération limitée). A l'inverse, nous pouvons supposer que les motocyclistes qui ont perçu systématiquement ou seulement à certaines occasions une sensation de chute (formant les groupes « répond toujours », « transition positive » ou « transition négative ») n'ont jamais expérimenté de chute et répondent à la tâche en fonction de leur représentation mentale de la chute.

Enfin, cette hétérogénéité semble faire écho à une étude récente [Neimer et Mohellebi, 2009] en simulation de conduite automobile, qui souligne qu'une même stratégie de commande peut produire des sensations et comportements différents selon les conducteurs. De telles variations de patterns suggèrent l'existence et la manifestation de différences interindividuelles vis-à-vis des caractéristiques interactives du simulateur. Il est bien connu que les styles perceptifs individuels (*i.e.*, préférence idiosyncratique) contribuent à la sélection de cadre de référence pour la perception du mouvement propre [Berthelon et al., 1998; Siegler, 2000]. En effet, la perception et le contrôle de notre orientation spatiale sont guidés par de multiples sources sensorielles (visuelle, vestibulaire, proprioceptive), mais ces informations peuvent mener à de multiples interprétations perceptives. En conséquence, le cerveau doit déterminer l'interprétation la plus probable au vue des informations sensorielles disponibles pour générer un percept cohérent et stable. Depuis plusieurs années, un certain nombre d'études psychophysiques [Ernst et Banks, 2002; Ernst et Bühlhoff, 2004; MacNeilage et al., 2007] suggère que le cerveau intègre ces informations sensorielles de manière quasi-optimale en assignant un coefficient (poids) à chaque information, proportionnellement à leur fiabilité (définie comme l'inverse de leur variance). Selon cette approche, pour optimiser la perception, l'intégration sensorielle doit permettre l'émergence d'un percept multisensoriel de l'orientation spatiale plus fiable avec une variance minimum. Ainsi, en situation de conflits sensoriels, le cerveau peut combiner les informations provenant des différentes modalités sensorielles en conflit pour former un percept intermédiaire qui sera biaisé vers les informations considérées comme étant les plus fiables. Récemment, Isableu et al. [2010] ont suggéré que cette théorie statistique d'intégration optimale, qui produit un percept multisensoriel fiable de l'orientation spatiale, peut dépendre principalement de la sélection d'un cadre de référence approprié. Par conséquent, le poids assigné aux informations sensorielles peut varier selon le cadre de référence préférentiel d'un individu (lié aux modalités sensorielles visuelle, vestibulaire ou proprioceptive), référé communément comme style perceptif. En situation normale, les informations sont redondantes et un individu utilisera préférentiellement un de ces cadres pour orienter son corps dans l'espace. Néanmoins, les individus peuvent changer

leur stratégie de combinaison des informations sensorielles en assignant un coefficient plus élevé aux informations fiables et un plus faible coefficient à celles non fiables, la fiabilité des informations visuelles et non-visuelles dépendant de leur style perceptif.

La capacité à sélectionner un cadre de référence approprié ou à en changer se positionne comme un candidat intéressant pour expliquer la manifestation de différences interindividuelles pour une même situation physique ou perceptive. Ceci est bien connu dans la littérature à travers le concept de Dépendance-Indépendance au Champ visuel (DIC) de Witkin et Asch [1948], qui permet de catégoriser les individus selon un continuum allant de dépendant au champ visuel (DC) à indépendant au champ visuel (IC). L'utilisation du test du cadre et de la baguette, plus connu sous le nom de « Rod and Frame Test » (RFT), permet d'établir cette dépendance-indépendance au champ visuel. Les personnes DC, majoritairement sensibles aux informations visuelles, assignent un coefficient plus élevé à ces informations (qu'elles soient statiques ou dynamiques) alors que les personnes IC se fondent préférentiellement sur les informations proprioceptives (égocentrées - vecteur idiotropique ou axe Z) ou sur les informations gravito-inertielles. Pour distinguer ces deux cadres de référence, une inclinaison de la tête et/ou du corps des participants est nécessaire durant la réalisation du test RFT [Golomer et al., 2005; Guerraz et Poquin, 1998]. Dès lors, nous pouvons supposer que selon leur cadre de référence spatial préférentiel, le coefficient assigné aux informations sensorielles délivrées sur simulateur peut varier selon les participants. Par conséquent, les larges différences interindividuelles observées pourraient provenir des perceptions différentes d'une même stimulation physique du simulateur, ces perceptions s'expliquant par la sélection de cadres de référence différents.

En effet, en environnement réel, lorsqu'un conducteur négocie un virage, il est exposé à la force gravito-inertielle (FGI), qui est la résultante des accélérations centrifuge et gravitaire, et est supposé aligner alors la moto avec la FGI afin de maintenir son équilibre et ne pas tomber. Cependant, les conducteurs assis sur un simulateur dynamique ne sont pas exposés à la FGI puisque la force centrifuge ne peut être produite sur simulateur, mais sont en revanche toujours exposés à la gravité. Ainsi, les personnes IC qui se basent préférentiellement sur les informations gravito-inertielles ou proprioceptives pour percevoir leur orientation (les coefficients les plus élevés sont assignés aux entrées vestibulaires et proprioceptives) sont probablement les plus perturbées durant cette tâche de perception de la chute puisqu'elles sont alors exposées à une stimulation physique radicalement différente de celle ressentie en situation réelle. A l'inverse, les personnes DC sont alors probablement les moins perturbées.

Par conséquent, les personnes IC auront tendance à percevoir davantage de sensations de chute que les personnes DC. Compte tenu des résultats, on peut ainsi supposer que les groupes « répond toujours », « transition positive » et « transition négative » seraient composés essentiellement de personnes IC, et le groupe « ne répond jamais » de personnes DC. Toutefois, cette hypothèse ne permet pas d'expliquer pourquoi les individus qui ne se sentent jamais chuter ne sont pas sensibles à la chute en condition yeux fermés.

En parallèle, nous pouvons émettre l'hypothèse que les individus IC qui se basent principalement sur les informations proprioceptives ou ceux qui s'appuient essentiellement sur les informations vestibulaires peuvent être très sensibles à l'influence de la gravité qui est plus importante lorsque la vitesse de roulis est faible, qui est détectée à la fois par les récepteurs somesthésiques et les organes otolithiques. Par conséquent, nous pouvons supposer que le groupe « transition négative » serait composé d'individus IC-proprioceptifs et IC-vestibulaires.

Pour les individus se basant préférentiellement sur les informations vestibulaires, le fait que l'axe de rotation en roulis sur simulateur soit éloigné de la tête du participant les expose à une accélération latérale tangentielle qui n'est pas présente en situation de conduite réelle. Par conséquent, cette accé-

lération tangentielle, si elle se situe au-dessus du seuil de détection, peut être détectée par les organes otolithiques et générer une sensation de chute. D'après le profil du mouvement de roulis (voir section 6.2.2), cette accélération tangentielle apparaît, dans notre étude, supérieure au seuil de détection des organes otolithiques à partir de la vitesse de 2 deg.s<sup>-1</sup>. En dessous de cette vitesse de roulis, la valeur de l'accélération latérale reste comprise au niveau du bruit de mesure qui est toutefois lui aussi supérieur au seuil de détection. On constate également que plus la vitesse de roulis est importante, plus la valeur de l'accélération latérale en début de rotation augmente. On peut alors supposer que les personnes IC s'appuyant principalement sur les informations vestibulaires vont être particulièrement sensibles à cette accélération tangentielle et ressentir plus fréquemment la chute lorsque les vitesses de roulis sont élevées. A l'inverse, les faibles accélérations tangentielles enregistrées pour les vitesses les plus basses ne généreraient pas ces instabilités. Par conséquent, nous émettons l'hypothèse que les participants du groupe « transition positive » seraient majoritairement IC-vestibulaires.

Toutefois, certains individus, bien qu'étant indépendant au champ, peuvent se baser sur l'ensemble des informations gravito-inertielles et proprioceptives pour s'orienter, contrôler leur mouvement ou posture. Ces individus peuvent avoir recours aux deux sous cadres de référence plutôt qu'un seul. Dans ce cas, il est probable que ces personnes se sentent chuter à la fois lors de vitesses de roulis faibles et élevées, nous supposons par conséquent que ces personnes composeraient principalement le groupe « répond toujours ».

Au vu des différentes hypothèses testées ou proposées, il est possible que les quatre patterns de perception de la chute sur simulateur moto aient une origine multifactorielle. Le tableau récapitulatif 7.3 offre ainsi une vue d'ensemble des différents facteurs explicatifs, testés ou proposés, de chacun des quatre patterns observés.

**TABLE 7.3** – Récapitulatif des divers facteurs explicatifs des différents patterns de réponse à la chute, pour chacun des groupes mis en évidence par la fonction logistique.

Facteurs explicatifs	Groupe			
	«Ne répond jamais»	«Répond toujours»	«Transition positive»	«Transition négative»
Expérience de conduite moto	plus expérimentés		moins expérimentés	
Expérience préalable vis-à-vis de la chute	ont déjà chuté à plusieurs reprises		n'ont jamais ou peu chuté	
Cadre de référence préférentiel (style perceptif)	DC	IC-vestibulaires ou IC-proprioceptifs	IC-vestibulaires	IC-vestibulaires ou IC-proprioceptifs

Note : DC = Dépendant au champ visuel ; IC = Indépendant au champ visuel.

## Chapitre 8

# Expérience 2 : Effet du positionnement de l'axe de rotation sur le seuil de détection de l'inclinaison et le seuil de perception de la chute.

### 8.1 Motivation et problématique de l'étude

Pour rappel, le simulateur IFSTTAR a été modifié sur le plan mécanique permettant de déplacer les axes de rotation. Cette modification donne ainsi la possibilité d'éloigner ou de rapprocher l'axe de rotation des mouvements en roulis d'un axe de rotation horizontal, et d'utiliser 3 points d'ancrage arrière différents. La position basse induit un axe de rotation des mouvements de roulis (passant par le haut des vérins électriques, point d'ancrage de la moto à l'avant) dévié de 50 degrés par rapport à l'horizontal (voir figure 6.2a, p. 99). La position haute génère quant à elle un axe de rotation dévié de 9 degrés par rapport à l'axe horizontal (voir figure 6.2b, p. 99).

Il est à noter ici que cette modification a été guidée par l'optimisation (contradictoire) de la position de l'axe de rotation en tangage et en roulis. Bien que les études s'intéressant aux seuils de détection du mouvement (ou inclinaison) propre s'appuient uniquement sur des axes de rotation contenus dans un plan horizontal (pour l'axe de tangage et de roulis), une étude [Yamasaki et al., 1998] a mis en évidence que la manipulation du positionnement du centre de rotation du tangage et du roulis dans ce même plan pouvait impacter les sensations de conduite sur simulateur moto (e.g., mise sur l'angle, stabilité, contrôle directionnel, accélération et décélération). Pour les mouvements de tangage (figure 8.1), l'abaissement du point d'ancrage et son positionnement sous le sujet en position de conduite permettent en effet de réduire les déplacements haut/bas de la tête et d'en augmenter les mouvements de rotation (par rapport à un axe qui serait placé plus haut et en arrière). Cette position est donc susceptible de mieux respecter les principes de sollicitation des vestibules pour la perception des accélérations. La position basse de la rotule serait alors à préconiser pour les mouvements de tangage.

Néanmoins, cette préconisation est potentiellement contradictoire avec celle d'un axe proche de l'horizontal pour les mouvements de roulis. Si la position basse du point d'ancrage va dans le sens du respect des principes physiques de l'inclinaison en moto, l'axe de rotation étant dans ce cas situé au niveau du point de contact pneu-chaussée, elle s'accompagne, cependant, d'une course importante pour atteindre l'angle d'inclinaison désiré (figure 8.2) et d'une production non compensée d'accélérations tangentielles qu'il faudrait en définitive limiter au maximum (afin de minimiser les sensations de déséquilibre). A l'inverse, si le point d'ancrage haut viole les principes physiques du contact pneu-chaussée, il permet, par un axe de rotation passant sous la selle, de réduire la course d'inclinaison pour atteindre l'angle de roulis

désiré (figure 8.2) et de limiter les accélérations tangentielles non compensées du fait de l'absence de la force centrifuge.

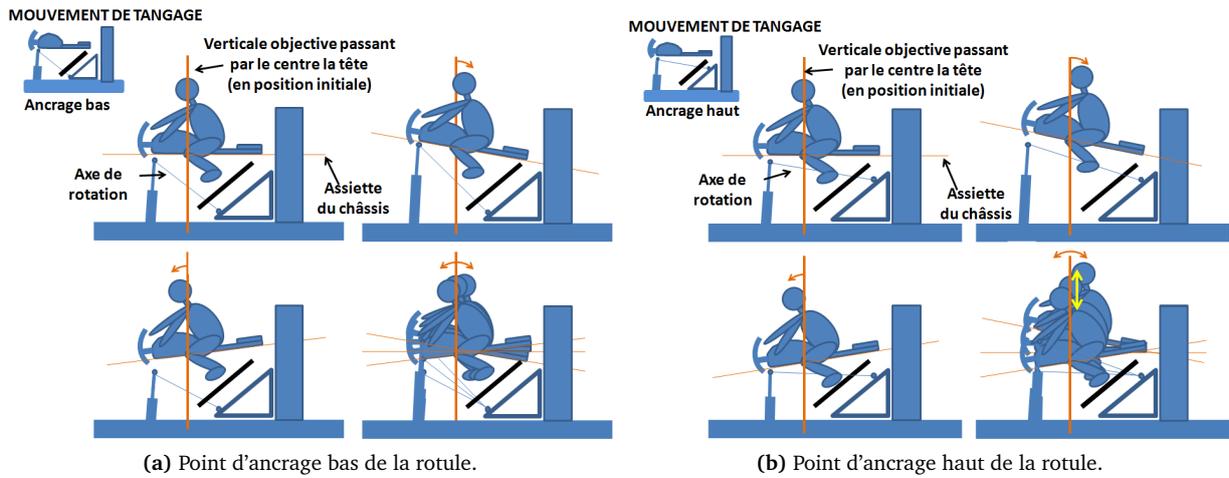


FIGURE 8.1 – Impact du point d'ancrage arrière de l'axe de rotation sur les mouvements de tangage.

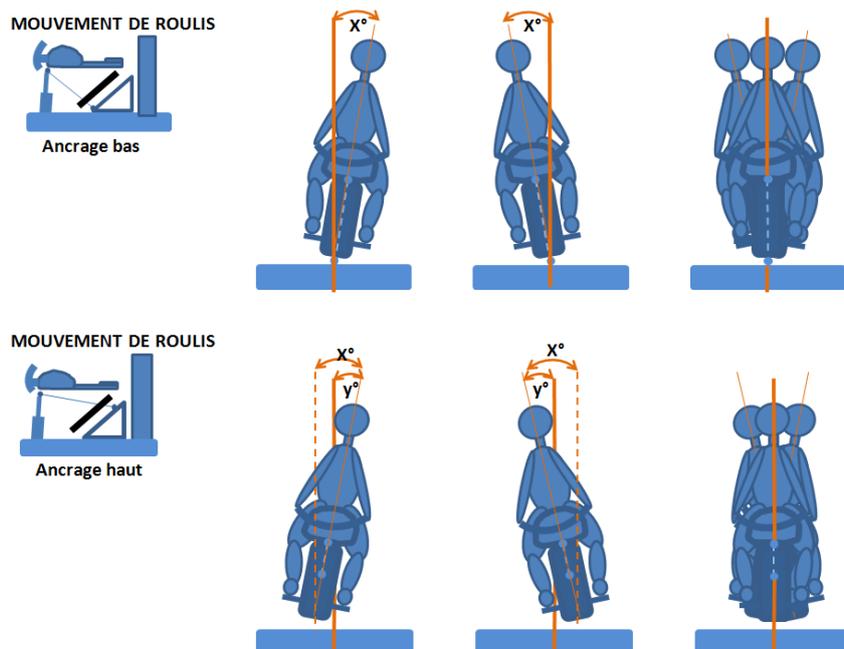


FIGURE 8.2 – Impact du point d'ancrage arrière de l'axe de rotation sur les mouvements de roulis. Cette figure illustre, selon le point d'ancrage arrière de l'axe de rotation, l'impact sur l'angle d'inclinaison. Pour un même angle d'inclinaison de  $x^\circ$ , le point d'ancrage haut permet de recourir, par rapport à la position neutre du simulateur, à un angle de déviation inférieur, comparativement au point d'ancrage bas.

Par conséquent, cette étude est destinée à investiguer l'impact potentiel du positionnement de l'axe de roulis sur la sensibilité du conducteur au mouvement de roulis afin de déterminer la configuration la plus appropriée à conserver pour la suite du processus de dimensionnement de la plate-forme mobile. Cette expérience a ainsi comparé l'effet, sur la sensibilité au mouvement de roulis, d'un point d'ancrage arrière haut (9 degrés de déviation par rapport à l'horizontal) et d'un point d'ancrage arrière bas (50

degrés de déviation).

Reprenant les bases de l'expérience 1 (voir chapitre 7), cette expérience a toutefois été simplifiée sur différents aspects. Nous nous sommes intéressés seulement au roulis physique minimum nécessaire à fournir au conducteur pour qu'il perçoive l'inclinaison (*i.e.*, tâche de détection de l'inclinaison) et au roulis physique maximum utilisable (*i.e.*, tâche de perception de la chute).

Sur la base du développement précédent, nous pouvons donc supposer, pour la tâche de détection de l'inclinaison, que le seuil de détection de l'inclinaison ne sera pas influencé par la position de l'axe de roulis puisque l'angle de déviation (d'inclinaison) par rapport à la verticale objective n'est pas modifié d'un axe à l'autre. Pour la tâche de perception de la chute, nous pouvons supposer que le point d'ancrage haut entraînera une moindre sensibilité à la chute, mise en évidence par une diminution du nombre de réponses de détection et/ou un angle au moment de la réponse plus élevé, comparativement au point d'ancrage bas. La vitesse seuil peut également être impactée mais le sens de cette évolution dépend des patterns de réponse mis en évidence précédemment.

## 8.2 Méthode

### 8.2.1 Participants

Huit motocyclistes (6 hommes et 2 femmes ; âge moyen = 32 ans, ET = 4 ans ; nombre moyen d'années de permis = 8,8 ans, ET = 6,6 ans ; nombre moyen de kilomètres par an = 13750 km/an, ET = 7382 km/an) ont participé à cette étude. Tous ont une vue normale ou corrigée à la normale.

### 8.2.2 Dispositif expérimentale et tâche

L'expérience a été réalisée avec le même dispositif que précédemment (roulis maximum toujours limité à 12,5 degrés), moyennant la modification mécanique et son impact sur le positionnement et donc le choix de l'axe. Sur le modèle de l'expérience précédente, les participants ont réalisé une tâche de détection de l'inclinaison et une tâche de perception de la chute. La tâche de détection du mouvement n'a pas été reconduite afin d'alléger le protocole expérimental. Les participants devaient fournir leurs réponses en utilisant les mêmes boutons que précédemment.

### 8.2.3 Plan expérimental

Pour chacune des deux tâches, ont été manipulés l'axe de roulis, la vitesse d'inclinaison en roulis et le côté d'inclinaison. L'axe de roulis pouvait soit être incliné de 50 degrés par rapport à l'horizontal lorsque le point d'ancrage arrière était en position basse, soit incliné de 9 degrés lorsque le point d'ancrage était en position haute (figure 6.2). Les deux directions d'inclinaison ont été utilisées comme précédemment. Pour la vitesse, respectivement six et sept vitesses de roulis ont été utilisées pour la tâche de détection de l'inclinaison (0,25, 0,5, 1, 2, 4 et 8 deg.s<sup>-1</sup>) et pour la tâche de perception de la chute (1, 2, 4, 8, 16, 32 et 48 deg.s<sup>-1</sup>). Pour la tâche de détection de l'inclinaison, le plan expérimental 6 vitesses x 2 côtés d'inclinaison x 2 axes (incliné de 50° dit « axe à 50° » et incliné de 9° dit « axe à 9° ») résultait en 24 conditions expérimentales différentes. Pour la tâche de perception de la chute, le plan expérimental 7 vitesses x 2 côtés d'inclinaison x 2 axes résultait en 28 conditions expérimentales différentes.

## 8.2.4 Procédure

Une fois arrivés au laboratoire, les participants ont dans un premier temps pris connaissance des différentes informations relatives à l'expérience et à son déroulement avant de signer le formulaire de consentement. Ils ont ensuite complété un questionnaire informel portant sur leur pratique du deux-roues. Enfin, l'expérimentateur leur présentait le simulateur et ses différents constituants avant de leur expliquer le principe des différentes tâches à effectuer et de procéder à une session de familiarisation.

Au cours de cette session, les participants ont réalisé douze essais d'entraînement pour chacune des deux tâches, avec deux directions d'inclinaison et trois vitesses de roulis (2,5, 5 et 10  $\text{deg.s}^{-1}$  pour la détection de l'inclinaison et 20, 30 et 40  $\text{deg.s}^{-1}$  pour la perception de la chute) présentés de manière aléatoire. Pour des raisons techniques liées à la modification du point d'ancrage arrière et donc de la position de l'axe (ce changement nécessitait une vingtaine de minutes), la session d'entraînement a été accomplie dans la condition d'axe par laquelle les participants ont débuté la session expérimentale. Par conséquent, la moitié des participants a débuté la session d'entraînement et la session expérimentale avec l'axe à  $50^\circ$  et l'autre moitié avec l'axe à  $9^\circ$ . Au cours de cette session comme de l'expérience proprement dite, la pièce était éclairée et les participants portaient leur casque moto. Après s'être assuré que les détails relatifs à chaque tâche étaient clairs et compris des participants, l'expérimentation débutait.

Pour la tâche proprement dite, les participants devaient effectuer 3 essais par condition expérimentale. Cela résultait en un total de 72 essais pour la tâche de détection de l'inclinaison (répartis en 4 blocs de 18 essais), et de 84 essais pour la tâche de perception de la chute (répartis en 4 blocs de 21 essais).

En raison du temps nécessaire à la modification du point d'ancrage arrière, les participants ont réalisé les deux tâches une première fois avec le premier axe puis une seconde fois après que le changement d'axe ait été effectué. L'ordre de passation des axes et des tâches était contrebalancé entre les participants. Pour chaque axe, les participants ont donc réalisé deux blocs d'essais pour la tâche de détection de l'inclinaison et deux blocs d'essais pour la tâche de perception de la chute. A l'intérieur de chacun de ces blocs, la vitesse de roulis et le côté d'inclinaison étaient présentés de façon aléatoire.

Une pause de 3 min était observée entre chaque bloc d'essais et entre chaque tâche et, une pause de 20 min au moment du changement d'axe. La session complète a duré 1h approximativement.

## 8.2.5 Analyse des données

Comme dans la première expérience, les mesures ont porté, pour la tâche de détection de l'inclinaison, sur le temps de réponse (correspondant au temps écoulé entre le début du mouvement de roulis et la réponse du participant) et sur l'angle d'inclinaison au moment de cette réponse. Pour la tâche de perception de la chute, les réponses de perception ont été traitées à partir de la fonction logistique afin d'identifier la vitesse de roulis à laquelle la transition entre percevoir et ne pas percevoir s'opère et la pente de la courbe. L'angle d'inclinaison au moment de la réponse a également été mesuré.

Pour la tâche de détection de l'inclinaison, les différentes variables dépendantes ont été analysées à partir d'une ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison x Axe, tandis que pour la tâche de perception de la chute, les variables dépendantes ont été analysées à partir d'un test  $t$  de Student. Le niveau de significativité a été fixé à 0.05 pour toutes les analyses statistiques. La taille de l'effet ( $\eta^2$ ) est également rapportée. Lorsque nécessaire, le test post-hoc de Newman-Keuls a été utilisé afin de déterminer les différences significatives.

### 8.3 Résultats et discussion

Comme pour la première expérience, les analyses ont initialement été réalisées avec la direction de l'inclinaison parmi les variables indépendantes. Ce facteur n'ayant produit aucun effet significatif (principal ou d'interaction) sur la détection de l'inclinaison comme sur la perception de la chute, il a été exclu des analyses. Cette absence d'effet est en accord avec les résultats de l'expérience 1 et d'études antérieures s'intéressant à la perception du mouvement dans les simulateurs de vol qui n'ont montré aucun effet du côté d'inclinaison sur les seuils de détection de l'inclinaison [Benson et Brown, 1989; Gundry, 1978; Okada et al., 1999; Otakeno et al., 2002].

Concernant la tâche de détection de l'inclinaison, une ANOVA à mesures répétées 6 Vitesses de roulis x 2 Axes de roulis, avec le temps de réponse comme variable dépendante, a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(5, 36) = 59.78, p < .001, \eta^2 = .90$ . En revanche, aucun effet principal ou d'interaction de la position de l'axe n'a été mis en évidence. Un test post-hoc sur l'effet principal de la vitesse indique une diminution significative du temps de réponse avec l'augmentation de la vitesse de roulis. Le temps de réponse aux vitesses les plus faibles (0,25, 0,5, et 1  $\text{deg.s}^{-1}$ ) est significativement supérieur aux autres vitesses. L'analyse a également mis en évidence l'existence d'un plateau dans le temps de réponse à partir de 2  $\text{deg.s}^{-1}$ , le temps mis pour détecter l'inclinaison ne variant plus de manière significative entre 2 et 8  $\text{deg.s}^{-1}$  (tableau 8.1). Ces résultats corroborent ceux obtenus lors de l'expérience 1. Pour une discussion détaillée des résultats, nous renvoyons le lecteur à la discussion de cette même expérience.

Une seconde ANOVA à mesures répétées sur l'angle d'inclinaison au moment de la réponse a également révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(5, 35) = 84.37, p < .001, \eta^2 = .92$ . Aucun autre effet n'a été révélé. Le test post-hoc sur l'effet de la vitesse a indiqué une absence de différence significative entre les vitesses de 0,25 et 0,5  $\text{deg.s}^{-1}$  mais un angle d'inclinaison significativement plus élevé aux vitesses de roulis supérieures (tableau 8.1). Comme nous pouvons le remarquer à partir du tableau 8.1, l'angle minimum nécessaire pour détecter son inclinaison propre est en moyenne de 2 degrés (ET = 0,79 degrés), pour une vitesse de roulis de 0,25  $\text{deg.s}^{-1}$ . Cet angle est en accord avec les résultats de l'expérience 1 (en condition yeux ouverts). De plus, ce résultat est en adéquation avec le seuil moyen de détection de l'inclinaison en roulis de 2 degrés, mis en évidence en condition yeux ouverts par Otakeno et al. [2002] sur le simulateur ASDD.

TABLE 8.1 – Moyenne des temps de réponse et angle au moment de la détection de l'inclinaison en fonction du positionnement de l'axe de roulis et de la vitesse de roulis.

Détection de l'inclinaison		Vitesse de roulis ( $\text{deg.s}^{-1}$ )					
		0,25	0,5	1	2	4	8
Temps de réponse (s)	Axe à 50°	8,24	4,56	2,75	1,51	0,93	0,62
	Axe à 9°	7,97	4,41	2,49	1,49	0,92	0,59
Angle au TR (degré)	Axe à 50°	2,06	2,28	2,75	3,02	3,72	5,00
	Axe à 9°	1,99	2,21	2,49	2,98	3,67	4,71

Note : TR = Temps de Réponse.

Les résultats de la présente étude indiquent que le positionnement de l'axe de roulis ne semble pas influencer la sensibilité du conducteur pour la détection de son inclinaison propre. Ce résultat était attendu puisqu'il est rapporté dans la littérature que la détection de l'inclinaison est un phénomène plutôt statique sollicitant donc les organes otolithiques et les récepteurs somesthésiques qui répondent respectivement aux changements d'orientation du corps par rapport à la verticale gravitaire et aux modifications de pression et de stimulations tactiles induites. Or, nous avons pu noter en section 8.1 que l'angle de déviation

par rapport à la verticale objective n'est pas modifié d'un axe à l'autre, alors que l'accélération tangentielle produite est quant à elle modifiée selon le point d'ancrage de l'axe de roulis, et est plus importante au point d'ancrage bas. Bien que l'accélération tangentielle soit détectée par les organes otolithiques, de nombreuses études indiquent que la détection de l'inclinaison dans des conditions quasi-statiques est assurée principalement par les informations somesthésiques plutôt que par les informations otolithiques [Bringoux et al., 2000, 2002, 2003; Janssen et al., 2011; Teasdale et al., 1999]. Par conséquent, comme les changements de pression, tactiles et graviceptifs induits par l'angle de déviation produit par rapport à la verticale gravitaire ne diffèrent pas d'un axe à l'autre, le seuil de détection de l'inclinaison n'est pas influencé par le positionnement de l'axe.

Concernant la tâche de perception de la chute, les résultats de la régression logistique révèlent, tout comme l'expérience 1, différents patterns de perception de la chute. Toutefois, dans cette étude, notre population était bien moins importante. Par conséquent, hormis quelques analyses qui ont été conduites, la majorité des résultats sera présentée de manière descriptive. Les patterns observés se répartissaient de la façon suivante :

- Trois participants (pattern avec une « transition positive ») ont ressenti une chute de plus en plus fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis, la transition (argument  $\alpha$  de la fonction logistique) s'opérant pour une vitesse de roulis moyenne de 18,15 deg.s<sup>-1</sup> et une pente (argument  $\beta$  de la fonction) de 1,76 deg.s<sup>-1</sup>. La vitesse au moment de la transition était, respectivement, de 14,21 et 21,40 deg.s<sup>-1</sup> pour l'axe à 50° et à 9°.
- Un participant a ressenti une chute uniquement pour les plus faibles vitesses de roulis ( $\alpha = 2,51$  deg.s<sup>-1</sup> ;  $\beta = 0,003$  deg.s<sup>-1</sup>).
- Un participant a ressenti une chute de plus en plus fréquemment avec l'augmentation de la vitesse lorsque l'axe de roulis était incliné de 50° par rapport à l'horizontal. En revanche, lorsque l'axe était incliné de 9°, ce participant n'a globalement pas ressenti de chute (1 réponse de détection sur 42 essais).
- Les trois participants restants ont produit des patterns de réponse que la fonction logistique n'a pu analyser. Deux participants ont produit des patterns de réponse en U, avec de plus fortes probabilités de percevoir la chute aux vitesses basses et hautes. Le dernier participant a quant à lui produit des patterns de réponse « en zigzag ».

La fonction logistique suggère ainsi que, pour une plage de mouvement la plus étendue, la probabilité de perception de la chute la plus faible se situe entre des vitesses de roulis de 2,51 deg.s<sup>-1</sup> (vitesse à laquelle la probabilité de détecter passe sous le seuil de .50 pour le participant ayant un pattern de réponse avec une « transition négative ») et 21,40 deg.s<sup>-1</sup> (vitesse jusqu'à laquelle la probabilité de détecter reste sous le seuil de .50 pour les participants ayant un pattern de réponse avec une « transition positive ») dans la situation où l'axe est incliné de 9° par rapport à l'horizontal.

Nous nous sommes également intéressés à l'angle de roulis au moment de la réponse. Pour chaque sujet, nous avons calculé lorsqu'il était possible l'angle de roulis « seuil » correspondant à la vitesse de transition (au .50) déterminée par la fonction logistique. A cette fin, une fonction logarithmique a été dressée à partir des valeurs d'angles de roulis obtenu pour chaque réponse donnée en fonction de la vitesse d'inclinaison. L'angle de roulis « seuil » est alors calculé à partir de l'équation de la régression et de la vitesse de transition seuil déterminée précédemment par la fonction logistique. Compte tenu du faible échantillon, l'effet du positionnement de l'axe de roulis sur l'angle de roulis seuil n'a pas pu faire l'objet d'une analyse statistique. Les données relatives à l'angle de roulis seuil obtenu selon le pattern de réponse obtenu par la fonction logistique sont présentées dans le tableau 8.2 en fonction du positionnement de

l'axe de roulis.

Pour finir, nous nous sommes intéressés à l'influence du positionnement de l'axe de roulis sur le nombre moyen de réponses données à la perception de la chute. D'un point de vue descriptif, le nombre moyen de réponses à la perception de la chute est apparu plus important lorsque l'axe était incliné à 50° que lorsque ce dernier était incliné de seulement 9° (nombre moyen de réponses,  $M = 19,63$  et  $16,88$ ,  $ET = 10,43$  et  $11,63$ , respectivement pour l'axe incliné à 50° et l'axe incliné à 9°). Le nombre moyen de réponses données à la perception de la chute est présenté dans le tableau 8.2, en fonction du pattern de réponse mis en évidence par la fonction logistique et en fonction du positionnement de l'axe de roulis testé.

**TABLE 8.2** – Tableau récapitulatif des résultats de la perception de la chute. Pour chacun des groupes mis en évidence par la fonction logistique, ce tableau présente : le nombre de participants, le nombre moyen de détection de la chute, le seuil de détection de la chute (vitesse de transition seuil en  $\text{deg.s}^{-1}$ ) et l'angle de roulis seuil (en degré) correspondant à la vitesse de transition seuil, en fonction de l'axe de roulis testé (axe à 9° et axe à 50°).

Groupes mis en évidence par la fonction logistique	Nombre de participants	Nombre moyen de détection de la chute (sur 42 essais)		Vitesse de transition seuil ( $\text{deg.s}^{-1}$ )		Angle moyen de roulis seuil (degré)	
		Axe à 9°	Axe à 50°	Axe à 9°	Axe à 50°	Axe à 9°	Axe à 50°
Transition positive	3	15,3	17,3	21,4	14,9	12,1	9,7
Transition négative	1	12	12	2,5	2,5	12,6	11,4
Transition positive + «Ne répond jamais»	1	1	8	–	37,5	–	12,5
Profil en U	2	30,5	31,5	–	–	–	–
Profil en «zigzag»	1	15	22	–	–	–	–

Note : TR = Temps de Réponse.

En conclusion, cette étude confirme dans un premier temps les résultats révélés lors de l'expérience 1 (voir chapitre 7) : (i) un effet robuste de la vitesse de roulis dans la tâche de détection de l'inclinaison ; (ii) un angle moyen de détection de l'inclinaison de 2 degrés ; (iii) une hétérogénéité des patterns de réponse à la perception de la chute. De plus, cette étude montre que le positionnement de l'axe de roulis n'influence pas significativement ni le temps de réponse ni l'angle au moment de la détection de l'inclinaison puisque l'angle de déviation produit lors de l'inclinaison par rapport à la verticale objective, et donc la stimulation des récepteurs somesthésiques et otolithiques, n'est pas modifié(e) d'un axe à l'autre. En revanche, les résultats indiquent que le positionnement de l'axe de roulis influence le nombre moyen de perception de la chute, le point d'ancrage haut (axe incliné à 9°) produisant une moindre sensibilité à la chute (moins de réponses données). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que l'axe de roulis avec un point d'ancrage haut génère moins d'accélération tangentielle que lorsque le point d'ancrage est bas. Or, ces accélérations tangentielles qui ne sont habituellement pas présentes en situation réelle [Cossalter et al., 2004] peuvent constituer une source de perturbation pour le conducteur, avec en particulier une perturbation plus importante lorsque l'axe a un point d'ancrage bas. De plus, les résultats semblent montrer une influence du positionnement de l'axe de roulis sur le seuil de perception de la chute, pour le groupe « transition positive ». On peut observer un seuil absolu (à partir duquel la probabilité de se sentir chuter est supérieure à .50) plus élevé pour l'axe incliné à 9° que pour l'axe incliné à 50°. Ce résultat suggère que l'axe de roulis incliné à 9° permet d'intégrer une plage de mouvement (en termes de vitesse) plus importante au niveau des stratégies de commande que lorsque l'axe de roulis est incliné à 50°.

Enfin, la majorité des participants (5 sur 8 participants) ont indiqué verbalement ressentir un comportement plus naturel et stable du simulateur lorsque l'axe était incliné à 9° que lorsque l'axe était incliné à 50°. Dans ce dernier cas, ces cinq participants ont décrit unanimement leur ressenti par l'expression suivante : « j'ai eu l'impression de glisser sur une plaque de gazoil ». En revanche, deux participants n'ont ressenti aucune différence entre les deux axes testés et ont déclaré ne pas avoir conscience que le positionnement de l'axe avait été modifié. Seulement un participant a déclaré avoir un meilleur ressenti lorsque l'axe était incliné à 50°. Ces données verbales vont ainsi dans le sens des données objectives (nombre de perception de la chute et seuil de perception de la chute) présentées ci-dessus. Malgré son faible échantillon, cette étude suggère donc que l'axe de roulis incliné à 9° permet à la fois une moindre sensibilité à la perception de la chute et un ressenti plus naturel des mouvements du simulateur. Par conséquent, nous avons choisi de conserver cet axe de roulis dans les études suivantes.

## Chapitre 9

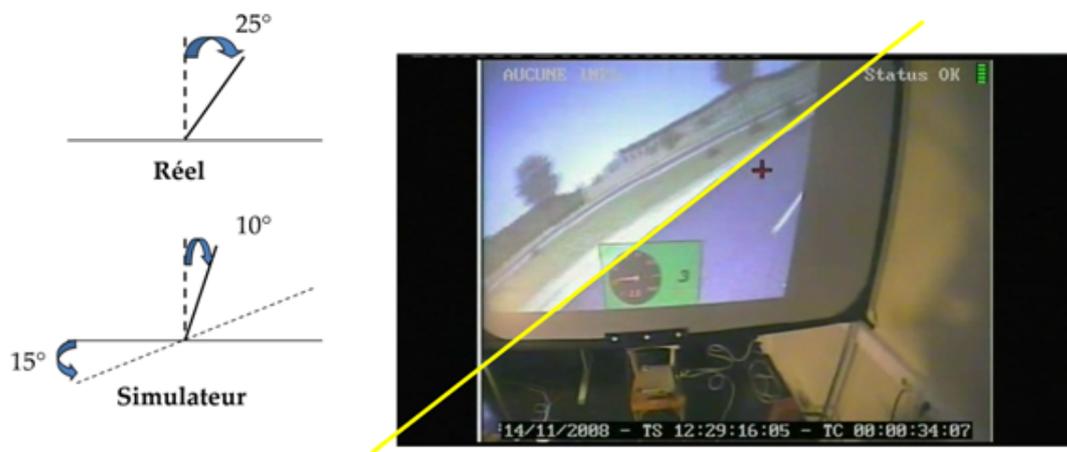
# Expérience 3 : Identification des paramètres du modèle de restitution visuo-inertielle de roulis ou comment les angles de roulis visuel et de roulis physique contribuent à la production d'une illusion d'inclinaison crédible lors d'une prise de virage.

### 9.1 Motivation et problématique de l'étude

Quelques études se sont intéressées à la caractérisation du couplage optimal entre l'amplitude du roulis physique – inclinaison de la moto à droite ou à gauche – et l'amplitude du roulis visuel – inclinaison de la scène visuelle à droite ou à gauche par une inclinaison de la ligne d'horizon – [Cossalter et al., 2010; Kageyama et Tagami, 2002; Stedmon et al., 2009]. Compte tenu des limites en mouvement des plates-formes existantes (IFSTTAR : 12,5° ; MotorcycleSim de l'Université de Nottingham : 25° ; DIGEM de l'Université de Padou : 20° ; Université de Nihon : 20°) et du recours à une inclinaison de la scène visuelle pour compenser cette limite et renforcer l'illusion d'inclinaison, différentes questions sous-jacentes à celle de la caractérisation du couplage optimal se posent :

- 1) Comparativement aux inclinaisons rencontrées en situation réelle, quelle proportion d'inclinaison faut-il restituer sur simulateur ?
- 2) Comment cette inclinaison globale doit-elle être répartie entre le roulis physique et le roulis visuel ?
- 3) Dans quelle direction le roulis visuel doit-il être incliné par rapport à la direction du virage (figure 9.1) ?
- 4) Quel est le rôle exact du roulis visuel dans l'illusion d'inclinaison ?

Parmi les études qui se sont intéressées à ces questions, Kageyama et Tagami [2002] ont montré que l'illusion d'inclinaison la plus crédible pour les motocyclistes était obtenue lorsque les facteurs d'échelle étaient fixés approximativement à 2,5 pour le roulis physique (soit 150 % de plus qu'en situation réelle) et à 1,2 au niveau du roulis visuel (soit 20 % de plus que si la physique était respectée). Ces données suggèrent que, sur simulateur, l'angle d'inclinaison doit être bien supérieur à celui atteint en situation réelle. Ce résultat pourrait s'expliquer par une stratégie visant à intensifier les stimulations possibles pour compenser l'absence de certaines informations gravito-inertielles. Mais, ce résultat reste néanmoins particulièrement surprenant dans la mesure où le facteur d'échelle à appliquer entraîne d'importantes



- (a) Illustration de l'utilisation d'une inclinaison de la scène visuelle ( $10^\circ$ ) dans le but de compenser les limites physiques du simulateur ( $15^\circ$  par rapport à l'inclinaison de  $25^\circ$  d'une moto réelle).
- (b) Illustration de l'inclinaison de la scène visuelle dans la direction opposée au sens du virage afin d'aller dans le sens des principes physiques de l'inclinaison en moto (e.g., visuellement, avoir l'impression de se rapprocher du sol).

FIGURE 9.1 – Exemple d'inclinaison de l'horizon visuel en sens opposé à la direction d'inclinaison de la moto

inclinaisons en roulis physique. Cela (re)pose la question de la perception de la chute au cours de la conduite simulée. De manière intéressante, l'étude de Cossalter et al. [2010] a mis en évidence un pattern de résultats opposé puisque la sensation d'inclinaison la plus réaliste est apparue lorsque le roulis visuel était proportionnellement plus important que celui du châssis de la moto. Malheureusement, Cossalter et al. [2010] n'ont pas spécifié le ratio exact entre le roulis visuel et physique, ni comment celui-ci a été déterminé. De plus, dans chacune de ces études, la direction du roulis visuel par rapport au roulis physique reste floue et non renseignée. Dans l'étude de Stedmon et al. [2009], 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. Comme pour les études de Kageyama et Tagami [2002] et Cossalter et al. [2010], Stedmon et al. [2009] n'ont pas spécifié les paramètres exacts employés dans le modèle de restitution du mouvement de roulis (*i.e.*, l'angle de roulis total, le ratio entre les roulis physique et visuel).

Par conséquent, la présente étude avait pour objectif d'identifier les paramètres du modèle de restitution de roulis qui produisent pour les motocyclistes une illusion crédible d'inclinaison lors d'une prise de virage.

Dans cette situation précise, l'angle d'inclinaison de la moto, la vitesse de passage dans le virage et le rayon de courbure de la trajectoire co-varient. Ainsi, pour une même inclinaison de la moto, plus le rayon de courbure de la trajectoire augmente (virage plus large), plus la vitesse de passage augmente. De façon similaire, pour une courbure de virage donnée, une augmentation de la vitesse de passage s'accompagne d'une augmentation de l'angle d'inclinaison. Enfin, pour une vitesse donnée, les virages

avec les plus petits rayons de courbure (virages serrés) nécessitent les angles d'inclinaison en virage les plus importants. Devant ce constat, nous avons donc également cherché à déterminer l'influence de ces facteurs sur les paramètres de restitution du roulis. Alors que l'effet de la vitesse sur l'angle d'inclinaison est largement reconnu, nous avons manipulé, au cours de l'étude, le rayon de courbure de la trajectoire ainsi que l'inclinaison théorique d'une moto réelle, cette dernière variable se définissant comme l'angle d'inclinaison pris par une moto dans des conditions de vitesse et de rayon de courbure similaires.

Cette approche permettait en définitive de déterminer :

- a) la proportion d'inclinaison d'une moto réelle à restituer sur simulateur compte tenu des conditions de conduite ;
- b) la contribution respective du roulis physique et visuel (*i.e.*, le gain) pour différents angles d'inclinaison théorique et différents rayons de courbure de virages ;
- c) en sélectionnant des angles d'inclinaison théorique inférieurs et supérieurs à l'amplitude de mouvement maximal de la plate-forme ( $12,5^\circ$ ), dans quelle mesure les participants utilisent le roulis visuel ; en corollaire, il s'agissait également de déterminer si les participants utilisent le roulis visuel pour compenser les limites du roulis physique ou s'ils l'utilisent pour limiter les amplitudes de mouvement physique associées à une possible sensation de chute ?) ;
- d) la direction dans laquelle le roulis visuel est préférentiellement utilisé.

## 9.2 Méthode

### 9.2.1 Participants

Vingt deux motocyclistes (17 hommes et 5 femmes ; âge moyen = 33,4 ans ; ET = 7,2 ans ; nombre moyen d'années de permis = 10,8 ans, ET = 7,4 ans ; nombre moyen de kilomètres par an = 13068 km/an, ET = 7591 km/an) ont participé bénévolement à cette étude.

### 9.2.2 Dispositif expérimental

L'expérience a été menée sur le simulateur moto à plate-forme mobile de l'IFSTTAR, avec un point d'ancrage arrière haut (axe de roulis incliné de  $9^\circ$  par rapport à l'horizontal). La scène visuelle était projetée via un projecteur Plus Vision Corp U5-732h (1024 x 768 de résolution) sur un écran de 1,70 m de large et 1,20 m de hauteur. Assis sur le simulateur, les participants faisaient face à l'écran à une distance d'1 m, l'image projetée sous-tendant un champ visuel horizontal de 72 degrés et un champ de vision vertical de 54 degrés. La fréquence de rafraîchissement des images était de 30 Hz.

La scène visuelle texturée représentait une route sinueuse à deux voies séparées par un marquage central pointillé et bordées à l'extérieur par des lignes blanches continues (figure 9.2). Aucun trafic n'était utilisé. Pour chaque essai, la scène affichée consistait en une section de route droite longue de 100 m suivie de quatre virages (incluant deux virages à droite et deux à gauche) entrecoupés d'une ligne droite de 100 m de long. Au cours d'un essai, les virages avaient tous le même rayon de courbure. Chaque essai se terminait en ligne droite 50 m après la fin du dernier virage (un message s'affichait alors sur l'écran pour informer les participants de la fin de l'essai).



FIGURE 9.2 – Scène visuelle texturée utilisée au cours de l'expérience

### 9.2.3 Tâche et plan expérimental

La tâche des participants consistait à régler, pour chacun des 4 virages, l'angle d'inclinaison de la moto et de la scène visuelle dans le but d'atteindre une sensation de prise de virage crédible et acceptée, compte tenu des conditions de conduite (*i.e.*, rayon de courbure du virage et vitesse de déplacement, affiché en bas au centre de l'image). Les participants ne contrôlaient ni leur trajectoire ni la vitesse de la moto virtuelle, qui étaient automatisées, la trajectoire de la moto étant calculée pour être en permanence positionnée au centre de la voie de droite.

Une fois que les participants avaient effectué leur calibration initiale durant le premier virage, les paramètres du roulis sélectionnés étaient enregistrés et automatiquement restitués au virage d'après (et ainsi de suite pour chaque virage). Par conséquent, à partir du second virage, les participants devaient simplement ajuster leur réglage initial (en augmentant ou diminuant l'angle de roulis) jusqu'à ce qu'ils aient atteint la sensation d'inclinaison en virage la plus crédible. A la fin de chaque virage, la moto et l'horizon visuel revenaient automatiquement en position d'origine ( $0^\circ$ ) et la conservaient jusqu'à l'entrée du virage suivant.

Afin de réaliser cette tâche, les participants disposaient de deux paires de boutons poussoirs. La première paire de boutons incluait le klaxon et le démarreur (situés sur la poignée gauche et droite du guidon, respectivement) sur lesquels les participants appuyaient avec le pouce afin d'incliner le simulateur (châssis) dans la direction de l'appui (*i.e.*, gauche ou droite). L'angle d'inclinaison du simulateur augmentait aussi longtemps que les participants pressaient le bouton (dans la limite de l'angle de roulis maximum,  $12,5^\circ$ ). Les participants avaient la possibilité de diminuer leur inclinaison en appuyant sur le bouton opposé. La seconde paire de boutons était fixée au-dessus du klaxon et du démarreur, sur lesquels les participants appuyaient avec l'index afin d'incliner l'horizon visuel dans la direction de l'appui. La manipulation des boutons était telle que les deux mains pouvaient être gardées constamment sur le guidon.

La vitesse d'inclinaison du châssis de la moto et de l'horizon visuel et la vitesse à laquelle le simulateur

et l'horizon retournaient en position neutre étaient identiques mais dépendaient des conditions expérimentales ainsi que des réglages effectués par le participant (plus la vitesse de la moto et/ou l'amplitude de l'inclinaison augmente, plus la vitesse de roulis augmente).

Au cours de la tâche, l'angle d'inclinaison théorique (10, 20 et 30 degrés) ainsi que le rayon de courbure (150, 200 et 300 m) ont été manipulés. Les caractéristiques des différents virages utilisés sont présentées dans le tableau 9.1. La manipulation de ces deux variables a été guidée par plusieurs raisons. Pour l'angle d'inclinaison théorique, l'objectif était de pouvoir comparer l'angle de roulis total choisi par les participants et l'angle théorique atteint par une moto réelle dans des conditions de vitesse et de rayon de courbure similaires. Cette comparaison était destinée à déterminer la proportion d'inclinaison atteinte par une moto réelle nécessaire à restituer sur simulateur.

TABLE 9.1 – Caractéristiques des virages utilisés.

Rayon de courbure	Nombre de virages	Longueur du virage
150 m	2	<b>78,5 m*</b>
	2	157,1 m
200 m	2	78,5 m
	2	<b>157,1 m</b>
300 m	2	<b>157,1 m</b>
	2	314,2 m

\* : les valeurs en gras indiquent la longueur du dernier virage de chaque séquence, pour lequel les données ont été analysées. Ces valeurs étant différentes, nous avons vérifié si la différence de longueur impactait le roulis choisi. Après analyse et compte tenu des données disponibles, nous n'avons pas retenu ce paramètre pour l'analyse des données.

Pour le rayon de courbure, l'objectif était, en s'appuyant sur une situation où la trajectoire était imposée, d'étudier l'impact de ce facteur sur l'angle de roulis choisi par les participants. En effet, en situation réelle, l'angle de roulis atteint dépend de la vitesse de passage et du rayon de courbure du virage et également de la trajectoire empruntée. Cette variable cachée de la relation repose étroitement sur les stratégies individuelles de prise de virage (e.g., trajectoire visant à ouvrir l'angle de vision en maintenant le véhicule sur la portion extérieure de la voie par rapport à la direction du virage ou, à l'opposé, trajectoire cherchant à couper très tôt le virage). Imposer la trajectoire permettait ainsi de contrôler son rayon de courbure afin de mieux en mesurer l'effet sur l'inclinaison recherchée.

Dans la relation,  $v = \sqrt{(RC \cdot g \cdot \tan(\varphi))}$ , où  $v$  est la vitesse de déplacement,  $RC$  le rayon de courbure,  $g$  la gravité et  $\varphi$  l'angle d'inclinaison théorique, les différents termes de l'équation co-varient deux à deux (e.g., pour une vitesse donnée, si l'angle de courbure augmente, l'angle d'inclinaison augmente également). La manipulation conjointe de l'inclinaison théorique et du rayon de courbure a donné lieu à l'utilisation de neuf vitesses de passage différentes. Par conséquent, pour une inclinaison théorique donnée, plus le rayon de courbure augmentait, plus la vitesse de passage augmentait également (tableau 9.2).

#### 9.2.4 Procédure

Une fois arrivés au laboratoire, les participants ont dans un premier temps pris connaissance des différentes informations relatives à l'expérience et à son déroulement avant de signer le formulaire de consentement. Ils ont ensuite complété un questionnaire informel portant sur leur pratique du deux-roues ainsi que le questionnaire de mal du simulateur (SSQ, *Simulator Sickness Questionnaire*, Kennedy

**TABLE 9.2** – Vitesse de la moto virtuelle ( km.h<sup>-1</sup>) en fonction de l’angle d’inclinaison théorique et du rayon de courbure. Les vitesses sont déterminées sur la base de la relation suivante :  $v = \sqrt{(RC.g.\tan(\varphi))}$ , où  $v$  est la vitesse de déplacement,  $RC$  le rayon de courbure,  $g$  la gravité et  $\varphi$  l’angle de roulis de l’inclinaison théorique.

Rayon de courbure	Angle d’inclinaison théorique		
	10°	20°	30°
150 m	58	83	105
200 m	67	96	121
300 m	82	118	148

et al., 1993, voir Annexe B). Enfin, l’expérimentateur leur présentait le simulateur et ses différents constituants, puis le principe de la tâche ainsi que celui de l’utilisation des boutons réponse était présenté aux participants. L’expérimentateur effectuait ensuite une démonstration de la manipulation des boutons et de leur effet sur l’inclinaison de la moto et de la scène visuelle. Les participants étaient ensuite informés qu’ils étaient libres d’incliner les dimensions visuelle et physique à tout moment et toute amplitude jusqu’à obtenir la sensation d’inclinaison voulue.

Après ces instructions, les participants, assis en position de conduite sur le simulateur et portant leur propre casque moto, ont complété une session d’entraînement qui consistait en 6 essais de 4 virages chacun (de rayon de courbure de 300 m réalisés avec une vitesse de déplacement de 50 ou 90 km.h<sup>-1</sup>, ce qui impliquait une inclinaison théorique de 3,75 ou 11,98 degrés). Durant les deux premiers essais, les participants devaient se familiariser avec l’inclinaison du simulateur (châssis de la moto), puis avec le réglage du roulis visuel durant les deux essais suivants. Durant les deux derniers essais, les participants étaient libres de régler l’une ou l’autre des deux dimensions (visuelle ou physique), les deux ensemble ou encore aucune des deux dimensions, selon leurs besoins dans le but d’atteindre la sensation d’inclinaison souhaitée et attendue en virage.

Pour l’expérience proprement dite, les participants ont réalisé 6 essais par condition expérimentale, pour un total de 54 essais. Ces 54 essais étaient répartis en 9 blocs, chaque bloc correspondant à la présentation d’une condition expérimentale. Les 6 essais correspondaient à la réalisation de 3 essais se terminant par un virage à gauche et 3 essais se terminant par un virage à droite. A l’intérieur de chaque bloc, les séquences de virages (*i.e.*, se terminant par un virage à droite ou à gauche) étaient présentées aléatoirement. Les différents blocs d’essais étaient également présentés de façon aléatoire. A la fin de l’expérience, les participants ont de nouveau rempli le questionnaire du mal du simulateur. La session complète durait approximativement 1h30.

### 9.2.5 Analyses des données

Dans la mesure où les participants pouvaient affiner leur réglage jusqu’au dernier virage, l’angle de roulis physique et l’angle de roulis visuel obtenus à la fin du quatrième et dernier virage (*i.e.*, réglage final) ont été utilisés pour les analyses. De ces deux mesures, le roulis global (somme du roulis visuel et physique) et le gain (ratio du roulis visuel/roulis physique) ont également été calculés. Cette dernière variable, sans unité, rend compte de la relation entre le roulis physique et le roulis visuel. Ainsi, un gain de 1 correspond à une même amplitude de roulis physique et visuel, un gain supérieur à 1 indique que le roulis visuel est supérieur au roulis physique, et un gain inférieur à 1, un roulis visuel moindre comparativement au roulis physique.

Chacune de ces mesures dépendantes a été analysée par une analyse de variance (ANOVA) à mesures

répétées 3 Angles d'inclinaison théorique x 3 Rayons de courbure. Le niveau de significativité a été fixé à 0.05 pour toutes les analyses statistiques. La taille de l'effet ( $\eta^2$ ) est également rapportée. Lorsque nécessaire, le test post-hoc de Newman-Keuls a été utilisé afin de déterminer les différences significatives.

## 9.3 Résultats

Les analyses qualitatives ont révélé que, bien que les vingt-deux participants aient tous incliné la moto en direction du virage, dix-sept d'entre eux ont incliné, comme attendu, l'horizon visuel dans la direction opposée au virage. Parmi les participants restants, deux n'ont pas incliné l'horizon visuel (conservé horizontal), et trois l'ont incliné dans la même direction que la moto. Les données relatives à ces 5 participants ont été exclues des analyses principales et sont discutées séparément.

Les ANOVA ont été initialement réalisées avec la direction du virage prise en compte dans le modèle. Comme ce facteur n'a produit aucun effet significatif (effet principal ou d'interaction), il a été exclu du modèle.

### 9.3.1 Roulis physique

L'ANOVA à mesures répétées 3 Angles d'inclinaison théorique x 3 Rayons de courbure sur l'angle de roulis physique a révélé un effet principal de l'angle d'inclinaison théorique,  $F(2, 32) = 94.16, p < .001, \eta^2 = .85$ , et du rayon de courbure,  $F(2, 32) = 6.28, p < .01, \eta^2 = .28$ . Le test post-hoc sur l'effet principal de l'angle d'inclinaison théorique a indiqué que l'amplitude du roulis physique était significativement différente entre les trois conditions d'inclinaison théorique ( $M = 6,1, 9,1$  et  $10,9^\circ$ ,  $ET = 2,3, 2,2$  et  $1,6^\circ$ , pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés). Le test post-hoc sur l'effet du rayon de courbure a indiqué que l'amplitude du roulis physique était plus importante pour le rayon de courbure de 300 m ( $M = 9,2^\circ$ ,  $ET = 2,8^\circ$ ) comparativement aux rayons 150 et 200 m ( $M = 8,3$  et  $8,6^\circ$ ,  $ET = 2,8$  et  $2,9^\circ$ , pour, respectivement, 150 et 200 m) qui ne différaient pas de façon significative. L'interaction entre l'angle d'inclinaison théorique et le rayon de courbure n'était pas significative ( $p > .10$ ). Les moyennes pour l'amplitude du roulis physique sont présentées dans la figure 9.4.

### 9.3.2 Roulis visuel

L'ANOVA à mesures répétées 3 Angles d'inclinaison théorique x 3 Rayons de courbure sur l'angle de roulis visuel a révélé un effet principal de l'angle d'inclinaison théorique,  $F(2, 32) = 54.69, p < .001, \eta^2 = .77$ , et du rayon de courbure,  $F(2, 32) = 9.22, p < .001, \eta^2 = .37$ . Le test post-hoc sur l'effet principal de l'angle d'inclinaison théorique a indiqué que l'amplitude du roulis visuel augmentait avec l'inclinaison théorique, le roulis visuel étant significativement différent entre les différentes conditions d'inclinaison théorique ( $M = 5,8, 10,1$  et  $15^\circ$ ,  $ET = 4,3, 4,5$  et  $6,6^\circ$ , pour respectivement, 10, 20 et 30 degrés d'inclinaison théorique). Le test post-hoc sur l'effet principal du rayon de courbure a révélé que l'angle de roulis visuel augmentait avec le rayon de courbure, avec des différences significatives entre 300 m ( $M = 12,2^\circ$ ;  $ET = 7,1^\circ$ ) et 150 et 200 m ( $M = 9,4$  et  $9,4^\circ$ ,  $ET = 6$  et  $5,7^\circ$ , pour, respectivement, 150 et 200 m de rayon de courbure), qui ne différaient pas de façon significative.

L'interaction entre l'angle d'inclinaison théorique et le rayon de courbure était également significative,  $F(4, 64) = 2.49, p < .05, \eta^2 = .13$ . Le test post-hoc sur l'interaction a indiqué des différences significatives entre les rayons de courbure seulement pour l'angle d'inclinaison théorique de 30 degrés (figure 9.3). L'amplitude du roulis visuel était plus élevée pour le rayon de courbure de 300 m ( $M = 18^\circ$ ,  $ET = 8^\circ$ )

que pour les rayons de courbure de 150 m ( $M = 12,9^\circ$ ,  $ET = 4,8^\circ$ ) et 200 m ( $M = 14,1^\circ$ ,  $ET = 5,7^\circ$ ), qui ne se différencient pas de façon significative.

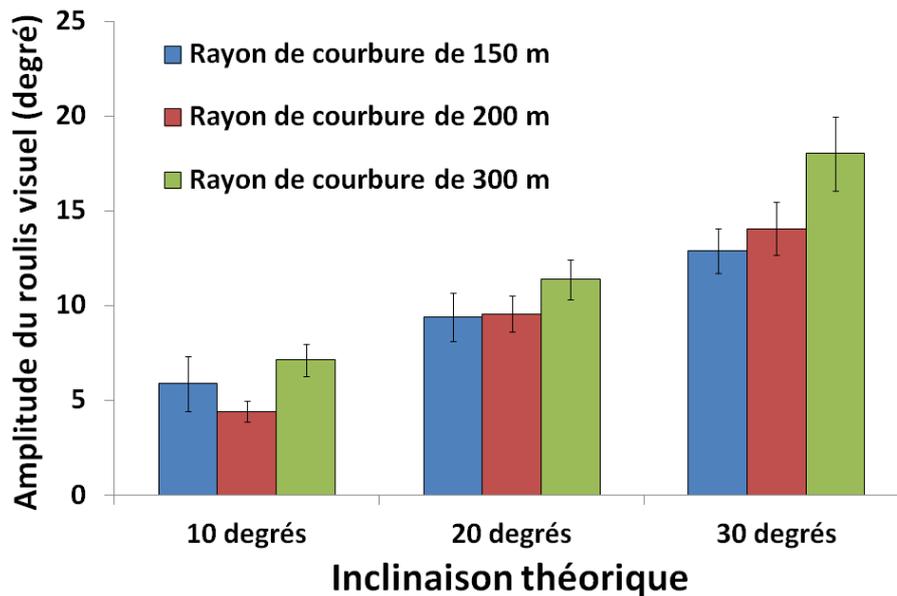


FIGURE 9.3 – Angle de roulis visuel en fonction de l’angle d’inclinaison théorique et du rayon de courbure. Les barres d’erreur représentent l’erreur standard.

### 9.3.3 Roulis global (somme du roulis physique et visuel)

L’ANOVA à mesures répétées 3 Angles d’inclinaison théorique x 3 Rayons de courbure sur l’angle de roulis global a révélé un effet principal de l’angle d’inclinaison théorique,  $F(2, 32) = 98.63, p < .001, \eta^2 = .86$ , et du rayon de courbure,  $F(2, 32) = 11.97, p < .001, \eta^2 = .43$ . Le test post-hoc sur l’effet principal de l’angle d’inclinaison théorique a indiqué que l’amplitude du roulis global augmentait de façon significative avec l’angle d’inclinaison théorique ( $M = 11,9, 19,2$  et  $25,9^\circ$ ,  $ET = 5,7, 6,1$  et  $7,5^\circ$ , pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés). Le test post-hoc sur l’effet du rayon de courbure a révélé que le roulis global était significativement plus élevé pour un rayon de courbure de 300 m ( $M = 21,4^\circ$ ,  $ET = 9,1^\circ$ ) que pour 150 ( $M = 17,7^\circ$ ,  $ET = 8,3^\circ$ ) et 200 m ( $M = 17,9^\circ$ ,  $ET = 8,1^\circ$ ) de rayon de courbure, la différence entre 150 et 200 m n’étant pas significative.

D’autre part, l’interaction entre l’angle d’inclinaison théorique et le rayon de courbure approchait le seuil de significativité ( $p = .06$ ), suggérant une augmentation du roulis global en fonction du rayon de courbure, seulement pour la condition de 30 degrés d’angle d’inclinaison théorique (figure 9.4).

### 9.3.4 Gain (ratio roulis visuel/physique)

L’ANOVA à mesures répétées 3 Angles d’inclinaison théorique x 3 Rayons de courbure sur le gain a révélé un effet principal de l’angle d’inclinaison théorique,  $F(2, 32) = 9.96, p < .001, \eta^2 = .38$ , et du rayon de courbure,  $F(2, 32) = 6.79, p < .001, \eta^2 = .30$ . Le test post-hoc sur l’effet principal de l’angle d’inclinaison théorique a indiqué que le gain était supérieur pour 30 degrés d’inclinaison théorique ( $M = 1,41, ET = 0,6$ ) comparativement à 10 ( $M = 0,99, ET = 0,6$ ) et 20 degrés ( $M = 1,13, ET = 0,4$ ), qui ne se différencient pas de manière significative. Le test post-hoc sur l’effet principal du rayon de courbure

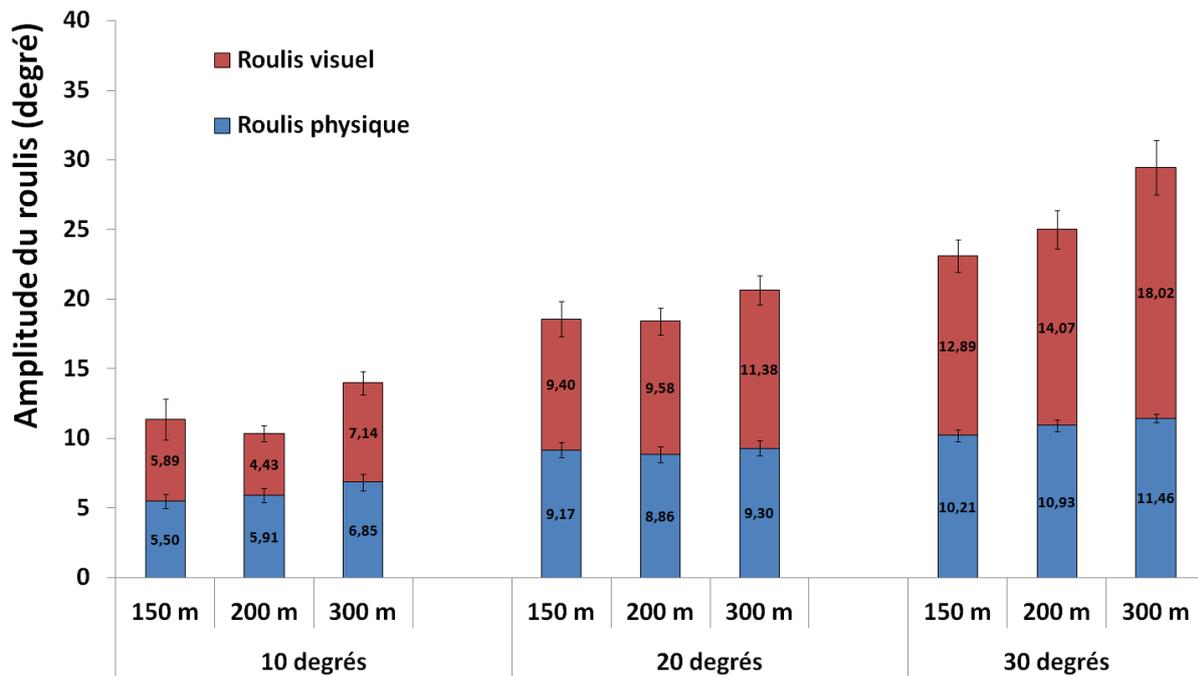


FIGURE 9.4 – Amplitude du roulis global (décomposé en roulis physique et visuel) en fonction de l’inclinaison théorique et du rayon de courbure. Les barres d’erreur représentent l’erreur standard.

a révélé que le gain était significativement plus élevé pour un rayon de courbure de 300 m ( $M = 1,36$ ,  $ET = 0,7$ ) comparativement à 150 ( $M = 1,11$ ,  $ET = 0,5$ ) et 200 m ( $M = 1,10$ ,  $ET = 0,5$ ). La différence entre 150 et 200 m n’était pas significative.

### 9.3.5 Vitesse et rayon de courbure

Les résultats portant sur le rayon de courbure ont montré que plus le rayon de courbure augmentait (et plus le virage était large), plus l’amplitude de roulis choisie par les participants augmentait également. Alors que dans la relation entre la vitesse de passage d’une moto dans un virage, le rayon de courbure et l’angle d’inclinaison de la moto prédit que pour une vitesse donnée, plus le rayon de courbure augmente, moins la moto s’incline, les résultats obtenus (figure 9.5) sont contre-intuitifs. Compte tenu du plan expérimental de cette étude, pour une inclinaison donnée, la vitesse de passage co-variait avec le rayon de courbure (tableau 9.2). Il ne peut donc pas être exclu que l’effet du rayon de courbure obtenu s’explique par la variation conjointe de la vitesse de la moto.

Afin de mieux comprendre les contributions respectives de la vitesse et du rayon de courbure aux amplitudes de roulis obtenues, des analyses de régression multiple ont été menées avec la vitesse et le rayon de courbure comme variables indépendantes, et l’amplitude du roulis des différentes mesures (visuel, physique, et roulis global) comme variable dépendante (avec des analyses séparées pour chaque variable dépendante).

Des modèles significatifs ont émergé pour toutes les variables dépendantes ( $F_s(2, 915) > 221.6$ ;  $ps < .001$ ). Les modèles ont expliqué 33 % de la variance pour le roulis visuel, 42 % de la variance pour le roulis physique et 43 % de la variance pour le roulis global ( $R^2$  ajusté = .32; .42 et .43, respectivement). Les résultats ont révélé des relations linéaires entre les facteurs vitesse et rayon de courbure et l’amplitude

du roulis visuel ( $\beta_s = .63$  et  $-.15$ ,  $p_s < .001$ , pour, respectivement, la vitesse et le rayon de courbure), entre ces deux mêmes facteurs et l'amplitude de roulis physique ( $\beta_s = .75$  et  $-.26$ ,  $p_s < .001$ , pour, respectivement, la vitesse et le rayon de courbure), et entre la vitesse et le rayon de courbure et l'amplitude du roulis global ( $\beta_s = .74$  et  $-.20$ ,  $p_s < .001$ , pour, respectivement, la vitesse et le rayon de courbure). Ces résultats mettent donc en évidence l'effet de la vitesse de passage mais soulignent également le rôle significatif du rayon de courbure sur les amplitudes de roulis.

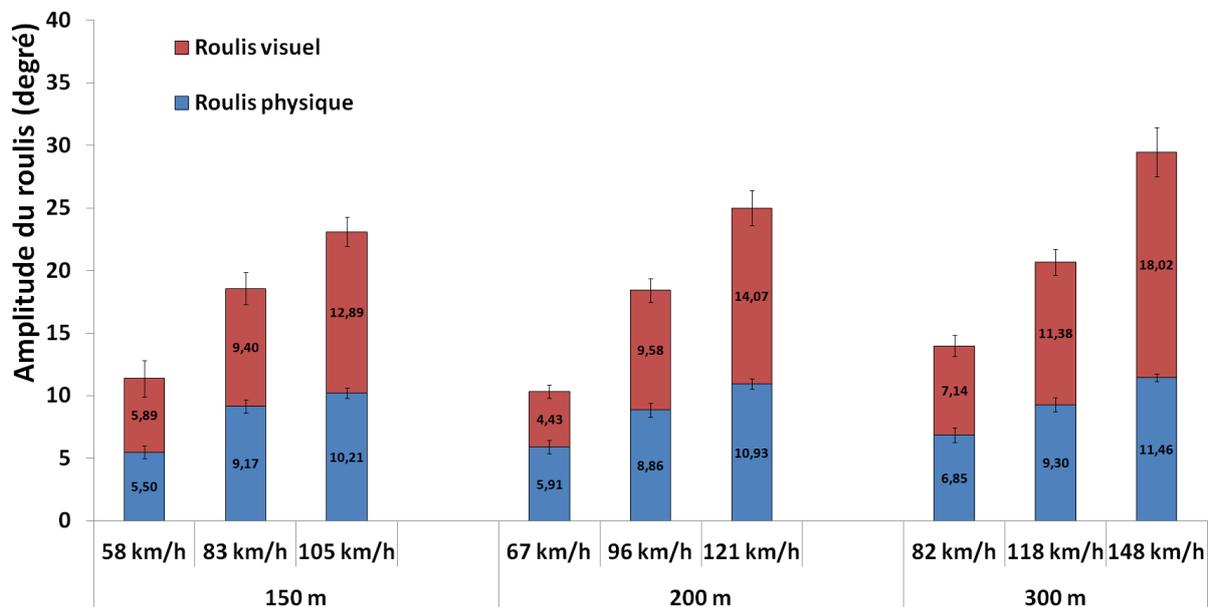


FIGURE 9.5 – Amplitude du roulis global (décomposé en roulis physique et visuel) en fonction du rayon de courbure et de la vitesse de déplacement. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

### 9.3.6 Autres patterns de réponse

Trois participants ont incliné la scène visuelle dans la même direction que la moto (*i.e.*, en direction du virage). Le roulis global moyen (calculé comme la somme des roulis visuel et physique) était de 12,3, 14,7 et 22,9° pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés d'inclinaison théorique. Les données (tableau 9.3) ont également suggéré que l'augmentation du roulis global résultait, de manière similaire à la population principale analysée précédemment, à la fois de l'augmentation du roulis visuel et du roulis physique (roulis visuel de 5,4, 7,0, 12,6° et roulis physique de 7,0, 7,7 et 10,3° pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés d'inclinaison théorique). Cependant, le rayon de courbure semble avoir eu assez peu d'effet sur ces participants (roulis visuel de 8,61, 7,80, 8,61° et roulis physique de 8,81, 8,29 et 7,81° pour, respectivement, 150, 200 et 300 m de rayon de courbure).

Deux autres participants n'ont pas incliné la scène visuelle. Conformément aux autres patterns de réponse, le roulis physique augmentait avec l'inclinaison théorique ( $M = 7,2$ ,  $8,9$  et  $10,2^\circ$  pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés). Pour ces deux participants également, le rayon de courbure n'a eu que peu d'effet sur l'angle de roulis produit ( $M = 8,8$ ,  $8,8$  et  $8,7^\circ$  pour 150, 200 et 300 m).

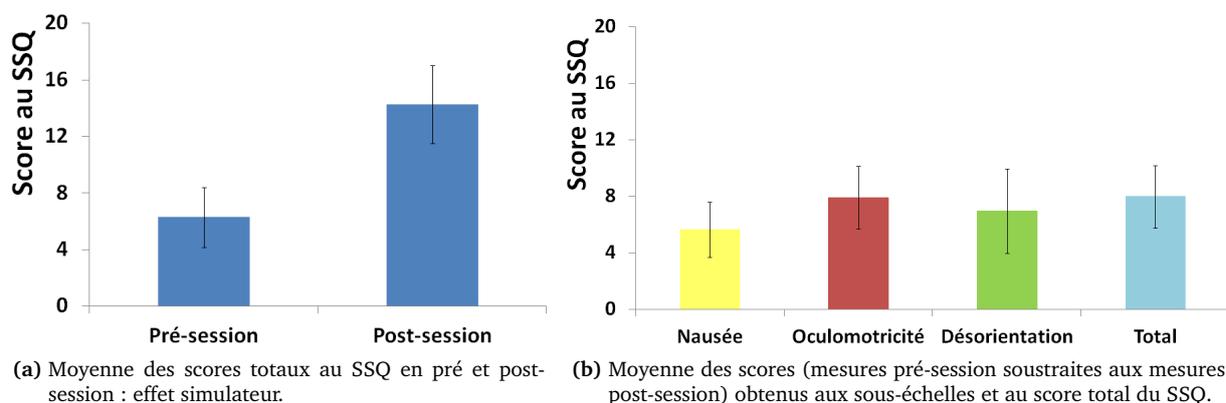
**TABLE 9.3** – Valeurs moyennes du roulis global (somme du roulis visuel et physique ; en degré) en fonction de l'inclinaison théorique (en degré) et du rayon de courbure (en mètre), pour les trois participants inclinant la scène visuelle dans la même direction que le sens du virage et pour les deux participants n'inclinant pas la scène visuelle.

		10 degrés			20 degrés			30 degrés			
		150 m	200 m	300 m	150 m	200 m	300 m	150 m	200 m	300 m	
MD	S1	RG	6,5	13,1	12,4	16,2	11,4	13,9	17,4	19,1	23,4
		RV/RP	3,1/3,4	7,3/5,8	6,6/5,8	8,5/7,7	6,1/5,3	7,1/6,8	9,5/7,9	10,2/8,9	12,1/11,3
	S2	RG	14,2	11,3	7,4	18,9	11,5	12,7	20,9	15,2	13,2
		RV/RP	5,5/8,7	4,4/6,9	3,4/4,0	9,2/9,7	4,6/6,9	6,4/6,3	9,2/11,7	6,8/8,4	6,3/6,9
	S3	RG	15,4	20,2	10,5	17,0	13,7	16,7	30,2	29,1	37,6
		RV/RP	6,1/9,3	8,5/11,8	3,6/6,9	8,6/8,4	5,7/8,0	6,9/9,8	17,7/12,5	16,7/12,4	25,1/12,5
SI	S1	RG	2,6	2,4	2,7	5,7	5,6	5,1	8,4	7,9	8,2
		RV/RP	0,0/2,6	0,0/2,4	0,0/2,7	0,0/5,7	0,0/5,6	0,0/5,1	0,0/8,4	0,0/7,9	0,0/8,2
	S2	RG	12,2	12,1	11,2	11,9	12,5	12,5	12,2	12,5	12,2
		RV/RP	0,0/12,2	0,0/12,1	0,0/11,2	0,0/11,9	0,0/12,5	0,0/12,5	0,0/12,2	0,0/12,5	0,0/12,2

Note : MD = Inclinaison de la scène visuelle dans la Même Direction que le sens du virage ; SI = Sans inclinaison de la scène visuelle ; RG = Roulis Global ; RV = Roulis Visuel ; RP = Roulis Physique, S1 = sujet 1.

### 9.3.7 Scores au SSQ

Le mal du simulateur a été évalué à l'arrivée des participants et à la fin de la session expérimentale au moyen du SSQ. Les données de l'ensemble des participants ayant participé à la session expérimentale ont été analysées. D'un point de vue descriptif, nous constatons que les scores obtenus (en soustrayant les mesures pré-expérimentales des mesures post-expérimentales) aux différentes sous-échelles sont assez faibles (figure 9.6b). Afin d'investiguer l'effet de l'exposition à l'environnement virtuel (dit "effet simulateur") sur le score total obtenu au questionnaire, un test *t* de Student a été réalisé sur les scores pré- et post session. Le test *t* de Student a révélé un *effet simulateur*,  $t(21) = -3.62, p = .002$ , les individus déclarant plus de symptômes en fin d'expérience qu'à leur arrivée (figure 9.6a).



**FIGURE 9.6** – Le mal du simulateur. Les scores maximaux sont de 200,34 pour la sous-échelle *nausée*, de 159,18 pour *l'oculomotricité*, de 292,32 pour la *désorientation* et de 235,62 pour le *score total* au questionnaire. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

## 9.4 Discussion

Le but de cette étude était de déterminer le roulis global, physique et visuel choisi par les participants en fonction de la courbure de la route et de l'inclinaison théorique d'une moto réelle, cette inclinaison étant directement dépendante de la vitesse de passage et du rayon de courbure. Bien que le mal du simulateur ait été mis en évidence lors de cette étude, les symptômes déclarés étaient d'intensité légère en comparaison aux scores maximaux des différentes sous-échelles du questionnaire. De plus, aucun participant n'a interrompu l'expérience, ce qui suggère que les caractéristiques de l'environnement utilisé ne produisent pas de cinétose et ne détériorent pas la réalisation de la tâche. Les résultats principaux ont révélé que la sensation d'inclinaison était la plus crédible lorsque le simulateur ainsi que la scène visuelle étaient inclinés, et que l'amplitude de l'inclinaison dépendait de l'inclinaison théorique, du rayon de courbure et de la vitesse de passage. Ces résultats sont discutés par la suite selon une double perspective, d'application et de confrontation aux quelques résultats déjà disponibles en matière de simulation de conduite deux-roues.

### 9.4.1 Le roulis global, ou quelle proportion d'inclinaison faut-il restituer ?

Pour ce qui concerne l'effet de l'inclinaison théorique, les participants ont reproduit assez précisément les angles d'inclinaison que les motocyclistes atteindraient sur route réelle afin de passer le virage de manière sûre dans des conditions de vitesse et de trajectoire similaires. En effet, le roulis global moyen obtenu était de 11,9, 19,2 et 25,9 degrés pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés d'inclinaison théorique. Ces angles de roulis global correspondent à une augmentation de l'inclinaison en simulation de conduite de 19 % pour une inclinaison de 10 degrés en situation réelle, et à une réduction de 4 et 14 % pour une inclinaison en situation réelle de 20 et 30 degrés. Pour des inclinaisons théoriques faibles, l'augmentation du roulis global peut s'expliquer par le manque d'informations gravito-inertielles que les conducteurs chercheraient à compenser en accentuant les stimulations. Une seconde source d'explication trouverait son origine dans la situation passive de conduite. Il est en effet possible que l'absence des leviers classiques (contre-braquage ou mouvements du corps, des genoux ou des pieds sur le corps de leur véhicule) pour déclencher et gérer une faible inclinaison perturbe les conducteurs et les empêche de calibrer au mieux l'angle de roulis. Pour les angles d'inclinaison plus importants, la réduction du roulis global comparativement au roulis théorique peut s'expliquer par une stratégie visant à minimiser le roulis physique (afin de prévenir la sensation de chute) mais également le roulis visuel, une rotation particulièrement élevée dans le flux visuel pouvant être nauséogène et/ou source de désorientation spatiale.

Alors que Kageyama et Tagami [2002] ont montré, pour la dimension visuelle et physique, une amplitude d'inclinaison en roulis très supérieure à ce qu'elle serait en situation réelle (20 % de plus pour le roulis visuel et 150 % de plus pour le roulis physique qu'en situation réelle), les différences de résultats peuvent être le reflet de différences méthodologiques. Dans notre étude, les participants déterminaient eux-mêmes le roulis physique et visuel en affinant au mieux, virage après virage, leur sensation d'inclinaison. Dans l'étude de Kageyama et Tagami [2002], les participants jugeaient le réalisme de divers algorithmes de mouvement pour lesquels le roulis était manipulé. Les paramètres de restitution du roulis étaient donc prédéterminés, impliquant l'établissement d'un choix par défaut de la part des participants. La nature de la tâche peut également expliquer ces différences, le passage de slaloms et d'un virage serré (sans précision sur ses caractéristiques exactes) pouvant entraîner des amplitudes de roulis plus importantes.

### 9.4.2 Comment répartir le roulis physique et le roulis visuel ?

Les résultats ont mis en évidence des gains de 0,99, 1,13 et 1,41 pour une inclinaison théorique de 10, 20 et 30 degrés. Pour 10 degrés d'inclinaison théorique, les participants ont partagé le roulis global de façon relativement équitable entre les dimensions visuelle et physique, même s'il leur était possible d'atteindre les 10 degrés d'inclinaison théorique uniquement avec la dimension physique (mouvement de la plate-forme mobile). Ce résultat montre donc qu'un mouvement minimum du visuel était nécessaire aux motocyclistes pour obtenir la sensation attendue d'inclinaison en virage, et ce, au détriment d'une utilisation plus importante du mouvement physique. Pour 20 degrés d'inclinaison théorique également, le réglage des participants a résulté en un gain proche de 1 (*i.e.*, 1,13), ce qui était attendu en raison des limites de la plate-forme mobile du simulateur. Également attendu, le gain de 1,41 pour une inclinaison théorique de 30 degrés confirme le rôle prépondérant de l'inclinaison de la scène visuelle dans la génération de la sensation d'inclinaison.

Ces données illustrent donc une utilisation de plus en plus prononcée du roulis visuel avec l'angle théorique d'inclinaison. Ce pattern de réponse était attendu du fait des limites en mouvement de la plate-forme, avec l'hypothèse que les conducteurs auraient recours au roulis visuel pour compenser cette limite. Les raisons pour lesquelles le roulis visuel serait utilisé sont avancées dans la section suivante.

### 9.4.3 Quel rôle le roulis visuel joue-t-il dans l'illusion d'inclinaison ?

Si l'hypothèse d'une compensation des limites du roulis physique tend à être confirmée par le gain moyen observé pour la condition de 30 degrés d'inclinaison théorique, les participants complétant l'angle désiré par une inclinaison de la scène visuelle, les données obtenues pour les inclinaisons 10 et 20 degrés ne vont pas dans ce sens. En effet, pour la condition 20 degrés, les participants pouvaient utiliser l'amplitude totale du roulis physique et compléter leur inclinaison par le roulis visuel. Ce type de réponse aurait donné lieu à un gain inférieur à 1. Les participants ont, à l'opposé, eu davantage recours au roulis visuel (gain supérieur à 1). Pour la condition 10 degrés, les participants pouvaient régler leur inclinaison préférentielle uniquement avec le roulis physique. Or, ils ont, au contraire, utilisé de façon relativement équitable le roulis physique et visuel.

A ces observations, il faut ajouter les données obtenues pour le roulis physique. Les résultats ont en effet montré que pour les trois conditions d'inclinaison, les participants n'ont pas employé la totalité du roulis physique à leur disposition. Pour 10, 20 et 30 degrés d'inclinaison théorique, l'angle de roulis de la moto était, respectivement, de 6,1, 9,1 et 10,9 degrés.

Pris dans leur ensemble, ces résultats ne vont pas totalement dans le sens d'une compensation des limites en mouvement de la plate-forme dynamique. Une possible raison à l'utilisation de plus en plus prononcée du roulis visuel reposerait alors sur le fait que les motocyclistes aient principalement cherché à éviter une sensation de chute, du fait de l'absence de force centrifuge, et qu'ils aient par conséquent limité le roulis physique. Dans l'expérience 1, nous avons souligné que la probabilité de se sentir chuter apparaissait et augmentait à partir d'un angle de 8,5 degrés. Ces résultats suggèrent alors que l'augmentation plus faible du mouvement physique par rapport au mouvement visuel n'est pas seulement conditionnée par les limites de la plate-forme mobile mais aussi par le fait que les individus peuvent ressentir une sensation de chute pour des angles importants. Toutefois, de manière anecdotique, aucun des participants ne s'est plaint, pendant l'expérience ou lors du débriefing oral, d'avoir ressenti une quelconque sensation de chute. Enfin, il est intéressant de noter que l'angle moyen de roulis physique pour les inclinaisons théoriques de 20 et 30 degrés (*i.e.*, 9,1 et 10,9 degrés) excède le seuil en angle à partir duquel la sensation de chute peut survenir. Ce résultat peut partiellement s'expliquer par la nature de la

tâche. Alors que Gundry [1977] a montré que les seuils de perception du mouvement en simulation de vol étaient influencés par la réalisation conjointe d'une tâche secondaire (cognitive), le seuil de détection de la chute en simulation de conduite moto peut, dans cette logique, se trouver augmenté (*i.e.*, moindre sensibilité à la chute) lorsque les participants sont engagés dans une tâche de conduite ou, comme c'est le cas dans cette expérience, dans la recherche d'une sensation d'inclinaison optimale.

Si les résultats laissent supposer que le roulis visuel tend effectivement à renforcer l'illusion d'inclinaison en compensant l'utilisation limitée du roulis physique, il est également possible que cette inclinaison de l'horizon soit utilisée, non pas comme moyen de compensation, mais simplement car elle procure une sensation de confort visuel. En effet, lors du débriefing, certains participants sont allés dans ce sens, jugeant l'horizon incliné comme la position de l'horizon la plus réaliste sans que forcément celle-ci n'augmente ou ne leur procure une sensation d'inclinaison. Ce confort visuel pourrait provenir d'un plus grand respect des principes géométriques de l'inclinaison en deux-roues lié, en particulier, au phénomène de rapprochement entre le conducteur et le sol.

Néanmoins, le fait que l'angle de roulis de la scène visuelle augmente avec l'inclinaison théorique ne supporte pas totalement ce retour d'information. En effet, si le roulis visuel n'a qu'une fonction de confort visuel, on peut supposer que les participants aient choisi et conservé un roulis visuel moyen quelle que soit l'inclinaison théorique. D'autre part, les résultats des études existantes de mise au point ou de validation de simulateur de conduite moto [Cossalter et al., 2010] ne vont pas dans le sens de ce retour d'information puisque l'angle d'inclinaison de la moto durant le virage (milieu de virage) n'était reproduit que visuellement, la stimulation physique n'intervenant que pendant les phases de transition. Considérés conjointement, ces résultats soulignent l'importance d'introduire, en simulation de conduite moto, une inclinaison de la scène visuelle, mais suggèrent que la fonction allouée à cette inclinaison peut dépendre des algorithmes de mouvement retenus (roulis physique maintenu constant dans le virage ou 'tilt' en roulis uniquement pendant les phases transitoires).

#### **9.4.4 Dans quelle direction le roulis visuel doit-il être incliné par rapport à la direction du virage ?**

Alors que Stedmon et al. [2009] ont testé deux patterns visuels (horizon incliné dans la direction opposée au virage et horizon maintenu fixe) sur le comportement de conduite du conducteur, notre étude a révélé en plus de l'existence des deux patterns étudiés par Stedmon et ses collègues un troisième pattern où les participants inclinaient l'horizon visuel dans la même direction que l'inclinaison de la moto (et donc du virage). En accord avec Stedmon et ses collègues [2009], notre étude indique que la majorité des motocyclistes a préféré l'inclinaison de l'horizon visuel en direction opposée au sens du virage. Toutefois, la raison pour laquelle certains individus inclinent l'horizon dans le même sens que l'inclinaison de la moto reste une question en suspens qui nécessite d'être appréhendée lors de futures études. D'après les rapports verbaux des participants, l'inclinaison de l'horizon dans ce sens leur paraissait (étonnamment) plus naturelle et réaliste que s'ils l'inclinaient dans la direction opposée au virage. De plus, cette inclinaison dans la même direction que le sens du virage leur permettait, selon leur déclaration, de produire « l'impression de tomber dans le virage » comme en situation réelle. D'autre part, l'un de ces trois participants a expliqué qu'il reconnaissait que cette inclinaison de l'horizon (dans la même direction que le virage) n'était pas 'naturelle' à proprement parler mais que sur simulateur, il ressentait le besoin que l'horizon s'incline de cette manière. En s'intéressant aux données relatives aux caractéristiques individuelles (âge, nombre d'années de permis moto), aucune différence a été trouvée avec la majorité des participants. Enfin, il est possible que ces différents patterns d'inclinaison de la

scène visuelle trouvent leur origine dans les comportements naturels d'orientation et de position de la tête lors de la prise de virage. En effet, certains participants ont déclaré ne pas incliner leur tête, la conservant donc alignée avec le corps. D'autres participants, minoritaires, ont déclaré incliner leur tête dans la même direction que le virage (vers l'intérieur du virage), alors que d'autres, majoritaires, ont déclaré relever la tête pour la maintenir (ou la ramener à proximité) proche de la verticale. Nous n'avons cependant pas mesuré le positionnement de la tête des participants durant l'expérience. Enfin, de futurs travaux sont nécessaires afin de répondre aux différentes questions soulevées dans cette discussion et, en vue d'évaluer l'impact de ces différents patterns d'utilisation de la scène visuelle sur la détection de l'inclinaison et la perception de la chute.

#### 9.4.5 Effet du rayon de courbure sur l'amplitude de roulis

Pour les dimensions visuelle et physique (et le roulis global), l'effet significatif du rayon de courbure a indiqué que l'amplitude du roulis augmentait comme une fonction positive du rayon de courbure. Les plus petites valeurs de rayons de courbure (150 m dans cette étude) représentent les virages les plus serrés. Comme expliqué en introduction, l'angle d'inclinaison d'une moto réelle dépend de sa vitesse et du rayon de courbure. Pour un rayon de courbure donné, plus les vitesses sont élevées plus l'angle d'inclinaison requis pour prendre le virage sera élevé. De manière similaire, pour une vitesse donnée, plus le rayon de courbure est petit plus l'angle d'inclinaison requis pour prendre le virage sera important. Enfin, pour un même angle d'inclinaison théorique, le rayon de courbure co-variait avec la vitesse (voir tableau 9.2), avec les vitesses les plus élevées pour les rayons de courbure les plus larges.

Le fait que les motocyclistes ont incliné à la fois l'horizon et la moto à une amplitude plus importante dans les virages de 300 m de rayon de courbure suggèrent que leur comportement était plus influencé par la vitesse de déplacement de la moto que par le rayon de courbure du virage ou par la combinaison des deux. En effet, les analyses de régression qui ont révélé une relation linéaire entre à la fois les facteurs de vitesse et de rayon de courbure et l'amplitude des roulis (visuel, physique et global) indiquent des relations plus fortes entre le facteur de vitesse et les amplitude de roulis ( $\beta > .63$ ), qu'entre le facteur rayon de courbure et les amplitude de roulis ( $|\beta| > .15$ ).

Néanmoins, dans la condition expérimentale 150 m de rayon de courbure x 20 degrés d'inclinaison théorique, le roulis visuel ( $M = 9,4^\circ$ ,  $ET = 5,2^\circ$ ), le roulis physique ( $M = 9,2^\circ$ ,  $ET = 2,2^\circ$ ) et le roulis global ( $M = 18,6^\circ$ ,  $ET = 6,8^\circ$ ) étaient plus élevés que les angles de roulis pour la condition 300 m x 10 degrés d'angle théorique (visuel :  $M = 7,1^\circ$ ,  $ET = 3,5^\circ$  ; physique :  $M = 6,9^\circ$ ,  $ET = 2,4^\circ$  ; roulis global :  $M = 14^\circ$ ,  $ET = 5,1^\circ$ ), en dépit d'avoir en pratique les mêmes vitesses (83 et 82 km.h<sup>-1</sup>, respectivement pour les deux conditions). De manière similaire, dans la condition 200 m x 30 degrés (vitesse de 121 km.h<sup>-1</sup>), les angles de roulis obtenus (visuel :  $M = 14,1^\circ$ ,  $ET = 5,8^\circ$  ; physique :  $M = 10,9^\circ$ ,  $ET = 1,7^\circ$  ; roulis global :  $M = 25^\circ$ ,  $ET = 6,8^\circ$ ) étaient plus importants que les angles de roulis (visuel :  $M = 11,4^\circ$ ,  $ET = 4,4^\circ$  ; physique :  $M = 9,3^\circ$ ,  $ET = 2,3^\circ$  ; roulis global :  $M = 20,7^\circ$ ,  $ET = 5,9^\circ$ ) obtenus dans la condition 300 m x 20 degrés (vitesse de 118 km.h<sup>-1</sup>). Ces résultats suggèrent ainsi que bien que les participants aient été influencés par la vitesse de la moto, ils ont été également sensibles aux différents rayons de courbure (en augmentant l'angle de roulis pour les virages serrés). Finalement, avec l'ensemble des mesures, le pattern de l'interaction entre l'angle d'inclinaison théorique et le rayon de courbure suggère que l'effet principal du rayon de courbure (augmentation graduelle de l'angle de roulis en fonction du rayon de courbure) apparaissait uniquement pour la condition 30 degrés d'angle d'inclinaison théorique.



## Chapitre 10

# Expérience 4 : Etude de la sensibilité des conducteurs au mouvement de roulis physique et visuel sur simulateur moto : Effet du couplage préférentiel sur les seuils de détection du mouvement et de l'inclinaison et le seuil de perception de la chute.

### 10.1 Motivation et problématique de l'étude

Les informations visuelles sont essentielles pour la conduite, cependant les seuils de détection ont été principalement étudiés dans un environnement sans source lumineuse ou avec des dispositifs visuels très simples (*e.g.*, diodes électroluminescentes, Benson et al., 1989). Ces seuils ne s'appliquent que partiellement à la simulation de conduite puisque ceux-ci sont susceptibles d'être différents des seuils mesurés dans un environnement visuel dynamique et réaliste, même basique (*e.g.*, Groen et al., 2007).

Par conséquent, l'objectif de l'étude était d'identifier les seuils de détection du mouvement et de l'inclinaison et le seuil de perception de la chute obtenus sur simulateur moto avec un environnement visuel dynamique couplé au mouvement du simulateur.

Compte tenu des différents couplages préférentiels mis en évidence dans l'expérience 3, nous avons cherché à déterminer ces seuils pour chacun des couplages identifiés. Cette étude a ainsi été menée en composant 3 groupes de participants différents, qui ont fait l'objet d'expérimentation distincte.

### 10.2 Méthode générale

#### 10.2.1 Participants

Vingt-neuf motocyclistes (24 hommes et 5 femmes, âge moyen = 36,4 ans ; ET = 7,9 ans ; nombre moyen d'années de permis = 11,8 ans, ET = 8,4 ans ; nombre moyen de kilomètres par an = 14285 km/an, ET = 8506 km/an) ont participé bénévolement à cette étude.

## 10.2.2 Dispositif expérimental et tâche

L'expérience a été réalisée avec le même dispositif de restitution visuelle et inertielle que précédemment (voir expérience 3), le roulis physique maximum restant toujours limité à 12,5 degrés. La scène visuelle représentait une route texturée infinie sans lignes de démarcation (figure 10.1). Les participants ne contrôlaient ni leur trajectoire ni la vitesse de la moto virtuelle, qui étaient automatisées. Ces deux paramètres n'étaient donc pas influencés par une quelconque action réalisée au niveau du guidon, de l'accélérateur, des freins ou du sélecteur de vitesse. Lors de chaque inclinaison de la plate-forme mobile, l'image visuelle reproduisait une prise de virage correspondante grâce aux propriétés du flux optique. La vitesse de déplacement était constante et fixée pour toutes les conditions expérimentales à 110 km.h<sup>-1</sup>.

Sur le modèle des expériences 1 et 2, les participants ont réalisé deux tâches différentes. Au cours d'une même stimulation en roulis, les participants ont réalisé une tâche de détection du mouvement et de l'inclinaison. La seconde tâche consistait en une tâche de perception de la chute. Les participants devaient fournir leurs réponses en utilisant les mêmes boutons que précédemment.

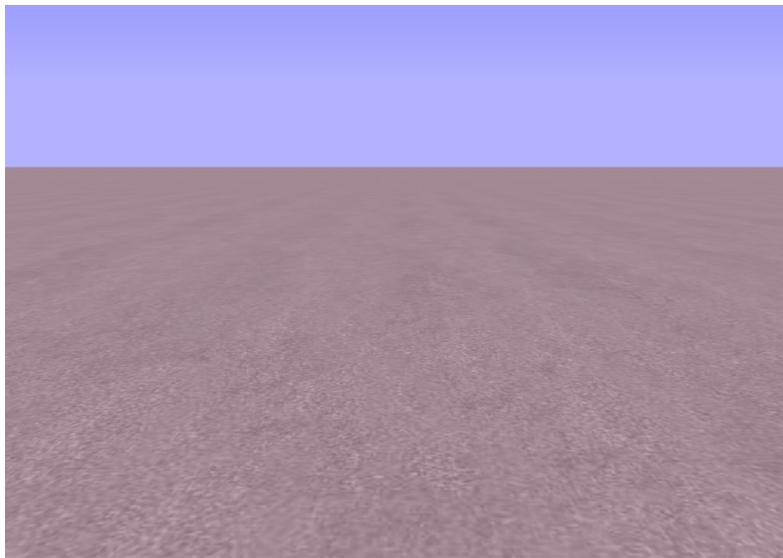


FIGURE 10.1 – Capture d'écran de la scène visuelle projetée durant cette étude.

## 10.2.3 Procédure

Une fois arrivés au laboratoire, les participants ont dans un premier temps pris connaissance des différentes informations relatives à l'expérience et à son déroulement avant de signer le formulaire de consentement. Ils ont ensuite complété un questionnaire portant sur leur pratique du deux-roues et sur leur technique de conduite en particulier lors de la prise de virage. De plus, les participants ont rempli une première fois le questionnaire du mal du simulateur (SSQ ; Kennedy et al., 1993).

Enfin, l'expérimentateur leur a présenté le simulateur et ses différents constituants avant de leur expliquer le principe des différentes tâches à effectuer et de procéder à une session de familiarisation ainsi qu'au test de 'catégorisation' permettant de déterminer le couplage entre le roulis visuel et physique préférentiellement utilisé par les participants. Ce test était strictement identique à la session d'entraînement de l'expérience 3 (voir section 9.2.4 pour plus de détails) au cours de laquelle il était demandé aux participants de régler les mouvements de la scène visuelle et/ou du simulateur (ou aucun des deux) afin

d'atteindre une sensation d'inclinaison aussi réaliste que celle ressentie en situation réelle. Afin de ne pas influencer les participants sur leur réglage, l'objectif réel de ce test n'a été divulgué aux participants qu'à la fin de l'étude. Selon le résultat du test, c'est-à-dire le couplage préférentiel, les participants ont été assignés à l'une des trois sessions expérimentales de l'étude, qui sont présentées successivement dans les prochaines sections.

Au cours de la session de familiarisation, les participants ont réalisé six essais d'entraînement pour chacune des deux tâches, avec deux directions d'inclinaison et trois vitesses de roulis (2,5, 5 et 10 deg.s<sup>-1</sup> pour la détection de l'inclinaison et 20, 30 et 40 deg.s<sup>-1</sup> pour la perception de la chute) présentés de manière aléatoire. Chacune de ces tâches a été réalisée dans la condition de couplage testée en session expérimentale. Au cours de cette session comme de l'expérience proprement dite, la pièce était éclairée et les participants portaient leur casque moto. Après s'être assuré que les détails relatifs à chaque tâche étaient clairs et compris des participants, l'expérimentation débutait.

A la fin de l'étude, les participants ont de nouveau rempli le questionnaire du mal du simulateur afin d'évaluer l'effet de l'exposition à un environnement virtuel.

## **10.3 Expérience 4A : Couplage préférentiel « Direction Opposée »**

### **10.3.1 Participants**

Sur la base du pré-test, seize motocyclistes (13 hommes et 3 femmes, âge moyen = 33,8 ans ; ET = 7,5 ans ; nombre moyen d'années de permis = 9,9 ans, ET = 6,9 ans ; nombre moyen de kilomètres par an = 13600 km/an, ET = 7295 km/an) ont été assignés au groupe ayant pour couplage préférentiel une inclinaison du visuel dans la direction opposée au virage. Pour des raisons logistiques, un dix-septième motocycliste a pris part uniquement à la tâche de perception de la chute.

### **10.3.2 Plan expérimental**

Dans cette expérience, le couplage entre le roulis visuel et le roulis physique présenté était celui identifié lors du pré-test, impliquant une inclinaison de l'horizon visuel dans la direction opposée au sens du virage (dit couplage « direction opposée »). Dans cette étude, ont ainsi été manipulés seulement la vitesse d'inclinaison en roulis et le côté d'inclinaison. Les deux directions d'inclinaison ont été utilisées comme précédemment.

Sept vitesses différentes de roulis ont été utilisées pour la tâche de détection du mouvement et de l'inclinaison (0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8 et 12 deg.s<sup>-1</sup>) et pour la tâche de perception de la chute (1, 2, 4, 8, 16, 32 et 48 deg.s<sup>-1</sup>). Les vitesses de roulis global présentées ci-dessus étaient partagées entre le roulis visuel et le roulis physique selon la valeur du gain moyen (*i.e.*, ratio entre le mouvement de roulis visuel et physique) identifié lors de l'expérience précédente (expérience 3). Le gain moyen intégré, pour cette condition de couplage « direction opposée » dans le modèle de restitution de roulis était de 1,15. La valeur de ce gain a été déterminée par la moyenne des réponses obtenues lors de l'expérience 3. Les valeurs de vitesses de roulis visuel et physique pour cette condition de couplage sont présentées dans le tableau 10.1.

Pour chacune des tâches, le plan expérimental 7 vitesses x 2 côtés d'inclinaison résultait en 14 conditions expérimentales différentes.

**TABLE 10.1** – Distribution des vitesses de roulis global ( deg.s<sup>-1</sup>) entre le roulis visuel et le roulis physique, pour la condition de couplage préférentiel « direction opposée », pour les tâches de détection du mouvement et inclinaison ainsi que la perception de la chute.

Tâche de détection du mouvement et de l'inclinaison			Tâche de perception de la chute		
Vitesse de roulis ( deg.s <sup>-1</sup> )			Vitesse de roulis ( deg.s <sup>-1</sup> )		
global	visuel	physique	global	visuel	physique
0,25	0,13	0,12	1	0,53	0,47
0,5	0,27	0,23	2	1,07	0,93
1	0,53	0,47	4	2,14	1,86
2	1,07	0,93	8	4,28	3,72
4	2,14	1,86	16	8,56	7,44
8	4,28	3,72	32	17,12	14,88
12	6,42	5,58	48	25,67	22,33

*Note* : les vitesses d'inclinaison visuelle et physique ont été obtenues à partir des relations suivantes : vitesse de roulis visuel ( deg.s<sup>-1</sup>) = (Vitesse Totale × Gain) / (Gain + 1), et vitesse de roulis physique ( deg.s<sup>-1</sup>) = (Vitesse Totale × 1) / (Gain + 1). Les vitesses de roulis ont été obtenues à partir d'un gain de 1,15 identifié en expérience 3.

### 10.3.3 Procédure

Pour la tâche proprement dite, les participants devaient effectuer 3 essais par condition expérimentale. Cela résultait, en un total de 42 essais pour la tâche de détection du mouvement et de l'inclinaison (répartis en 2 blocs de 21 essais), et de 42 essais également pour la tâche de perception de la chute (répartis en 2 blocs de 21 essais). L'ordre de passation des tâches était contrebalancé entre les participants. A l'intérieur des deux blocs, la vitesse de roulis et le côté d'inclinaison étaient présentés de façon aléatoire. Une pause était observée entre chaque bloc d'essais, et au moment du changement de tâche. La session complète a duré 1 h approximativement.

### 10.3.4 Analyse des données

Comme dans les deux premières expériences, pour la tâche de détection du mouvement, la mesure a porté sur le temps de réponse. Pour la tâche de détection de l'inclinaison, les mesures ont porté, sur le temps de réponse et sur l'angle de roulis global au moment de cette réponse. Pour la tâche de perception de la chute, les réponses de perception ont été traitées à partir de la fonction logistique afin d'identifier la vitesse de roulis à laquelle la transition entre percevoir et ne pas percevoir s'opère et la pente de la courbe. L'angle de roulis global au moment de la réponse a également été mesuré.

Ces différentes variables dépendantes ont été analysées à partir d'une ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison. Le niveau de significativité a été fixé à 0,05 pour toutes les analyses statistiques. La taille de l'effet ( $\eta^2$ ) est également rapportée. Lorsque nécessaire, le test post-hoc de Newman-Keuls a été utilisé afin de déterminer les différences significatives.

### 10.3.5 Résultats

Pour l'ensemble des tâches, l'ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison n'a révélé aucun effet principal ou d'interaction du facteur Côté d'inclinaison sur les différentes variables dépendantes retenues. Par conséquent, les analyses détaillées ci-dessous ont été conduites sur l'ensemble des essais sans distinction

du côté d'inclinaison.

### 10.3.5.1 Détection du mouvement

L'ANOVA à mesures répétées à une voie (7 vitesses de roulis) sur le temps de réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(6, 90) = 10.04, p < .001, \eta^2 = .40$ . Le test post-hoc sur l'effet principal de la vitesse de roulis a révélé une diminution significative du temps de réponse avec l'augmentation de la vitesse de roulis. Plus précisément, le temps de réponse à la vitesse de  $0,25 \text{ deg.s}^{-1}$  était supérieur aux autres vitesses. D'autre part, à partir de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ , aucune différence significative n'est apparue entre les vitesses de roulis plus élevées (1, 2, 4, 8 et  $12 \text{ deg.s}^{-1}$ ).

### 10.3.5.2 Détection de l'inclinaison

L'ANOVA à mesures répétées à une voie (7 vitesses de roulis) sur le temps de réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(6, 90) = 58.22, p < .001, \eta^2 = .80$ . Le test post-hoc sur l'effet principal de la vitesse de roulis a révélé une diminution significative du temps de réponse avec l'augmentation de la vitesse de roulis. Plus précisément, le temps de réponse aux vitesses  $0,25$  et  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$  était supérieur aux autres vitesses. D'autre part, à partir de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$ , aucune différence significative n'est apparue entre les vitesses de roulis plus élevées (2, 4, 8 et  $12 \text{ deg.s}^{-1}$ ).

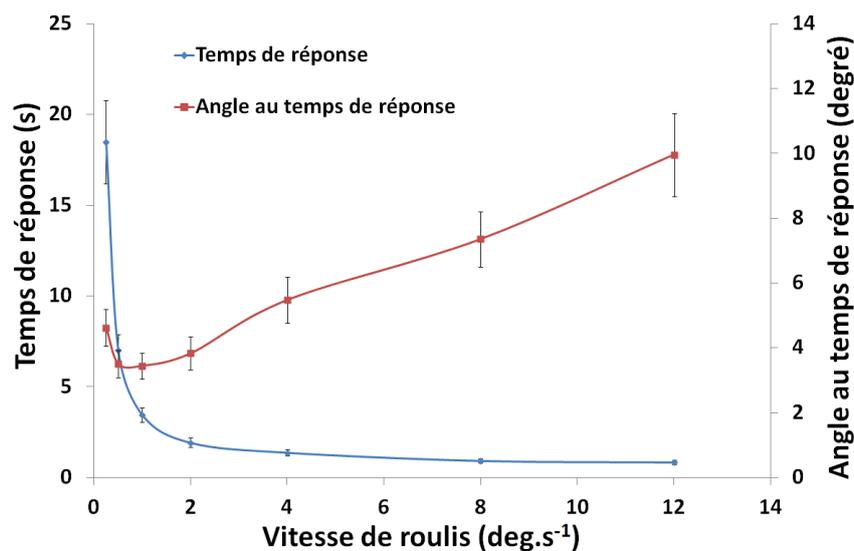


FIGURE 10.2 – Temps de réponse (s) et angle de roulis global au temps de réponse (degré) en fonction de la vitesse de roulis. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

L'ANOVA à mesures répétées sur l'angle de roulis global au moment de la réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(6, 90) = 26.16, p < .001, \eta^2 = .64$ . Les résultats ont indiqué une absence de différence significative entre les vitesses allant de  $0,25$  à  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ , mais une augmentation avec la vitesse de roulis de l'angle d'inclinaison au moment de la réponse à partir de  $4 \text{ deg.s}^{-1}$ . L'ensemble des données obtenues est présenté dans la figure 10.2.

### 10.3.5.3 Perception de la chute

Une première représentation des résultats (pourcentage de réponse positive, *i.e.*, chute perçue, en fonction de la vitesse de roulis ; voir la figure 10.3) a permis de mettre en évidence différents patterns

de réponse :

- Un groupe de participants (n=5) a perçu une sensation de chute de moins en moins fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis. La régression logistique, réalisée indépendamment de la direction de l'inclinaison, a mis en évidence pour ce groupe une transition entre ne pas percevoir et percevoir la chute pour une vitesse seuil de  $4,77 \text{ deg.s}^{-1}$  (ET =  $1,64 \text{ deg.s}^{-1}$ ). Ce résultat indique que ce groupe a ressenti une chute dans 50 % des cas jusqu'à une vitesse seuil de  $4,77 \text{ deg.s}^{-1}$ . L'analyse de régression logistique a d'autre part révélé, pour ce groupe, une pente négative (pente de  $-1,76 \text{ deg.s}^{-1}$  à la vitesse seuil ; ET =  $1,23 \text{ deg.s}^{-1}$ ) compte tenu du pattern de réponse (groupe nommé « *transition négative* »).
- Un second groupe de participants (n=5) a montré un pattern de réponse opposé, la probabilité de percevoir une chute augmentant avec la vitesse. La régression logistique a mis en évidence pour ce groupe une vitesse seuil de  $34,48 \text{ deg.s}^{-1}$  (ET =  $14,81 \text{ deg.s}^{-1}$ ) pour une pente positive de  $4,99 \text{ deg.s}^{-1}$  (ET =  $4,69 \text{ deg.s}^{-1}$ ) à cette vitesse (groupe nommé « *transition positive* »). Ce résultat indique donc que, à partir d'une vitesse de roulis de  $34,48 \text{ deg.s}^{-1}$  en moyenne, ces participants ont ressenti une sensation de chute dans 50 % des cas.
- Un groupe de participants (n=2) malgré quelques réponses positives (un participant n'a jamais répondu, alors qu'un autre participant a répondu 2 fois sur 84 essais), n'a pas ressenti de chute (groupe « *ne répond jamais* »).
- Un groupe de participants (n=4) a systématiquement ressenti la chute, quelle que soit la vitesse de roulis (groupe « *répond toujours* »)
- Enfin, les réponses données par le participant restant décrivaient un pattern de réponse marginal que la fonction logistique n'a pu analyser

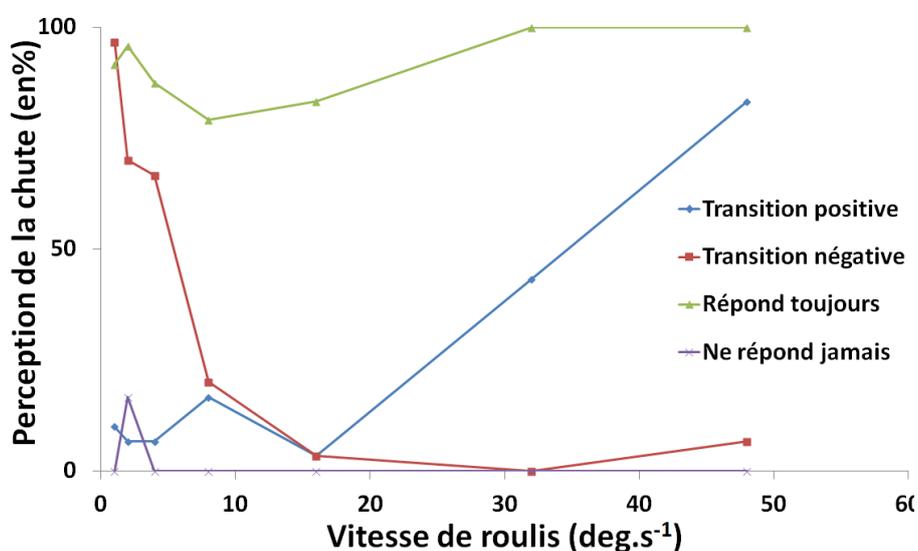


FIGURE 10.3 – Pourcentage de perception de la chute en fonction de la vitesse de roulis et des quatre principaux patterns de réponse mis en évidence par la fonction logistique.

Enfin, nous nous sommes intéressés à l'angle de roulis global au moment de la réponse. Pour chaque sujet des groupes « transition positive » et « transition négative », nous avons calculé l'angle de roulis global « seuil » correspondant à la vitesse de transition (au .50) déterminée par la fonction logistique. A cette fin, une fonction logarithmique a été dressée à partir des valeurs d'angles de roulis obtenues pour chaque réponse donnée en fonction de la vitesse d'inclinaison. L'angle de roulis global « seuil » a

alors été calculé à partir de l'équation de la régression et de la vitesse de transition seuil déterminée précédemment par la fonction logistique (le .50). L'ensemble des données obtenues est présenté dans le tableau 10.2 pour les groupes « transition positive » et « transition négative », et dans le tableau 10.3, pour le groupe « répond toujours ».

**TABLE 10.2** – Angles moyens de roulis global seuil (somme de l'angle de roulis visuel et physique, en degré) correspondant à la vitesse de transition (au .50 déterminé par la fonction logistique) pour chacun des groupes « transition négative » et « transition positive ».

Pattern de réponse	Couplage « direction opposée » (gain de 1,15)			
	Angles de roulis seuil (degré)			
		Global	Visuel	Physique
Groupe « transition positive »	M	25,47	13,62	11,85
	ET	2,33	1,25	1,08
Groupe « transition négative »	M	24,51	13,11	11,40
	ET	1,61	0,86	0,75

Note : M = moyenne, ET = écart type.

**TABLE 10.3** – Angles moyens de roulis (degré) au moment de la perception de la chute en fonction de la vitesse d'inclinaison, pour le groupe « répond toujours ».

Pattern de réponse	Vitesses de roulis ( deg.s <sup>-1</sup> )								
		1	2	4	8	16	32	48	
Roulis global	M	19,66	21,54	23,26	24,47	25,70	25,39	26,25	
	ET	1,08	1,57	1,58	4,36	1,14	1,42	1,38	
Roulis visuel	M	10,52	11,52	12,44	13,09	13,75	13,58	14,04	
	ET	0,58	0,84	0,85	2,33	0,61	0,76	0,74	
Roulis physique	M	9,15	10,02	10,82	11,38	11,95	11,81	12,21	
	ET	0,50	0,73	0,73	2,03	0,53	0,66	0,64	

Note : M = moyenne, ET = écart type.

#### 10.3.5.4 Scores au SSQ

Le mal du simulateur a été évalué à l'arrivée des participants et à la fin de la session expérimentale au moyen du SSQ. D'un point de vue descriptif, nous pouvons constater que les scores obtenus (calculés en soustrayant les mesures pré-expérimentales des mesures post-expérimentales) aux différentes sous-échelles sont assez faibles (figure 10.4b), les scores maximaux aux différentes sous-échelles approchant approximativement 200 points.

Afin d'investiguer l'effet simulateur, un test *t* de Student a été appliqué sur le score total obtenu en pré- et post session. Les résultats ont révélé un effet simulateur significatif sur le score total (figure 10.4a),  $t(16) = -3,72, p = 0,002$ ; M = 1,76 et 8,80, ET = 0,86 et 2,40, pour respectivement les scores totaux obtenus en pré-session et post-session), les participants déclarant plus de symptômes en fin d'expérience qu'à leur arrivée.

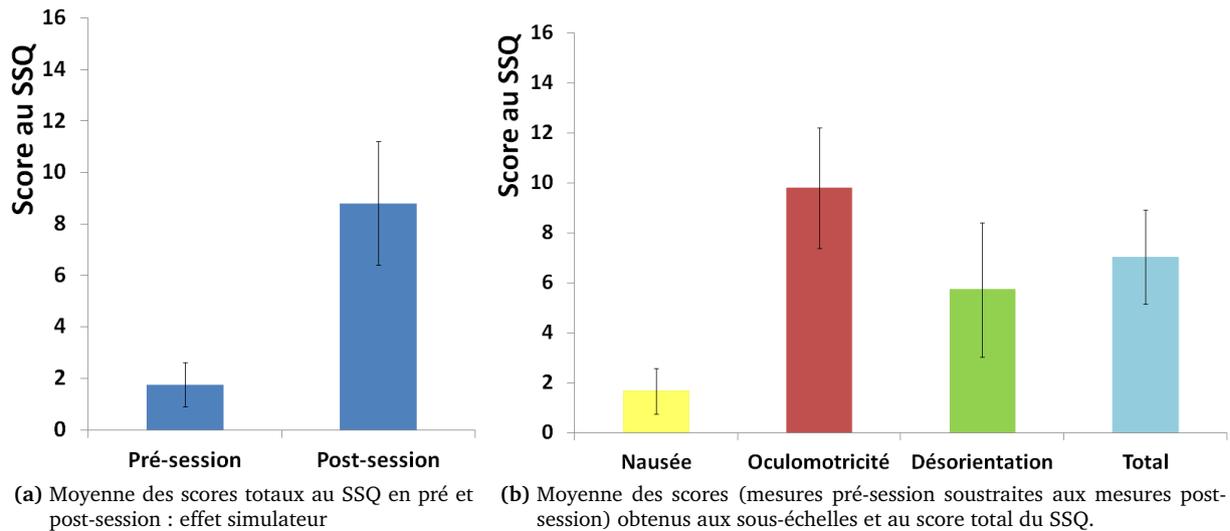


FIGURE 10.4 – Le mal du simulateur. Les scores maximaux sont de 200,34 pour la sous-échelle *nausée*, de 159,18 pour *l'oculomotricité*, de 292,32 pour la *désorientation* et de 235,62 pour le *score total* au questionnaire. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

### 10.3.6 Discussion

Cette étude s'inscrit dans un processus de dimensionnement des caractéristiques immersives et interactives d'un simulateur de conduite de deux-roues motorisé à plate-forme mobile. A cette fin, notre premier objectif était de déterminer, pour leur couplage préférentiel, les caractéristiques du mouvement du roulis pour lesquelles les utilisateurs détectent ce mouvement ainsi que celles pour lesquelles ils détectent l'inclinaison sans toutefois ressentir de chute. Nous avons, ainsi, exploré comment certains facteurs, tels que le côté et la vitesse d'inclinaison influençaient la détection.

Tout d'abord, les résultats n'ont indiqué aucun effet de la direction d'inclinaison que ce soit sur la perception du mouvement, de l'inclinaison ou de la chute. Cette absence d'effet est en accord avec les résultats des expériences précédentes et des études antérieures s'intéressant à la perception du mouvement ou de l'inclinaison dans les simulateurs de vol qui n'ont montré aucun effet du côté d'inclinaison sur les seuils de détection [Benson et Brown, 1989; Benson et al., 1989; Gundry, 1978; Okada et al., 1999; Otakeno et al., 2002]. Bien que le mal du simulateur ait été mis en évidence lors de cette étude, les symptômes déclarés étaient d'intensité légère en comparaison aux scores maximaux des différentes sous-échelles du questionnaire. De plus, aucun participant n'a interrompu l'expérience, ce qui suggère que les caractéristiques de l'environnement utilisé ne produisent pas de cinétose et ne détériorent pas la réalisation de la tâche. Les résultats ont en revanche indiqué un effet robuste de la vitesse de roulis sur les trois « seuils » de détection. Une forte hétérogénéité a été révélée au niveau des patterns de réponse à la perception de la chute.

#### Détection du mouvement

Les résultats relatifs à la détection du mouvement ont indiqué un effet de la vitesse de roulis sur les réponses des participants : plus la vitesse de roulis augmente, plus le temps de détection du mouvement diminue. Comme pour l'expérience 1, l'effet de la vitesse de roulis sur le temps de réponse suit la loi générale, de Piéron, qui modélise la relation entre le temps de réponse à un stimulus et l'intensité de ce dernier : le temps de réponse diminuant comme une fonction de puissance de l'intensité de la stimulation

(figure 10.5). Plusieurs études rendent compte d'une relation similaire entre le temps de réponse et l'intensité du stimulus, qu'il soit exprimé en termes de vitesse ou accélération angulaire [Clark, 1967; Gundry, 1978; Meiry, 1965]. Pour une discussion détaillée de ce résultat, nous renvoyons le lecteur à la discussion de l'expérience 1 (voir section 7.4).

Toutefois, cette étude a montré que le temps de réponse ne diminuait plus significativement avec la vitesse d'inclinaison à partir de la vitesse de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$  alors que pour les deux premières expériences, la détection du mouvement atteignait un plateau à partir de la vitesse  $4 \text{ deg.s}^{-1}$ . Cette différence de résultat peut trouver son origine au niveau des conditions expérimentales propres à chacune des expériences et plus précisément au niveau des vitesses d'inclinaison de la plate-forme mobile qui étaient, dans cette présente étude, soumises à un gain. D'autre part, l'apparition d'un plateau à partir de la vitesse de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$  concorde avec une sollicitation très tôt des canaux semi-circulaires, mise en évidence par les valeurs de roulis obtenues à partir de la centrale inertielle. On peut néanmoins noter que ce plateau apparaît également puisque la diminution du temps de réponse est conditionnée (limitée) par le fait que le temps de réaction humain à un stimulus est constant.

Par conséquent, comme pour l'expérience 1, la détection du mouvement semble ici être un phénomène principalement dynamique. On peut suggérer que les participants se sont essentiellement appuyés sur les informations vestibulaires fournies par les capteurs de vitesse angulaire (les canaux semi-circulaires) pour répondre lors de la tâche de détection du mouvement.

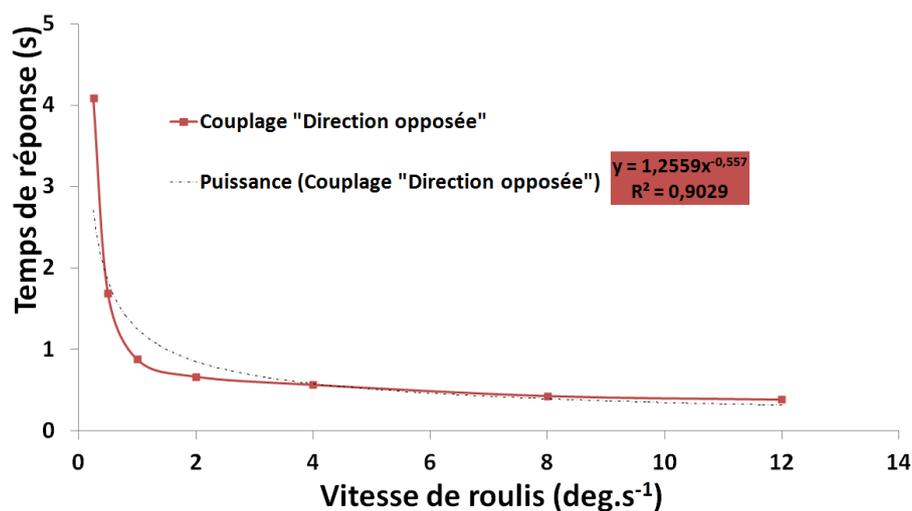


FIGURE 10.5 – Temps de réponse (s) en fonction de la vitesse de roulis pour la condition de couplage « direction opposée », obtenu dans la tâche de détection du mouvement. Est présentée dans l'encadré rouge l'équation de la fonction puissance ainsi que le  $r^2$  associé.

### Détection de l'inclinaison

Les résultats de la tâche de détection de l'inclinaison ont mis en évidence un angle de roulis global moyen minimum de détection de  $4,62$  degrés ( $\pm 2,30$  degrés). De plus, un effet robuste de la vitesse de roulis a été trouvé. Plus la vitesse de roulis augmente, plus le temps de réponse diminue et plus l'angle au moment de la réponse augmente. Toutefois, les résultats ont souligné l'apparition d'un plateau à partir de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$ , le temps de réponse ne diminuant plus de manière significative au-delà de cette vitesse. En revanche, les résultats ont montré que l'angle au moment de la réponse augmentait de manière significative à partir de la vitesse de roulis de  $4 \text{ deg.s}^{-1}$ . En deçà de cette vitesse de  $4 \text{ deg.s}^{-1}$ , l'angle au

moment de la réponse n'apparaît pas augmenter significativement. Chacun de ces résultats est discuté séparément.

**Angle moyen minimum de détection de 4,62 degrés** Les résultats ont mis en évidence un angle de roulis global moyen minimum de détection de l'inclinaison de 4,62 degrés ( $\pm 2,30$  degrés). Toutefois, il est à noter que l'angle de roulis global seuil est partagé entre un angle de roulis visuel (de 2,47 degrés) et un angle de roulis physique (de 2,15 degrés). Cet angle de roulis physique est en adéquation avec l'angle de détection mis en évidence lors de l'expérience 1 (angle moyen de 1,72 degrés) et également avec les angles de roulis physique rapportés dans la littérature [Gundry, 1978; Young, 1984], qui se situent autour de 2 degrés. Les stimulations visuelles présentées dans cette expérience sont néanmoins différentes de celle étudiées dans la littérature (pièce sans lumière, utilisation de diodes électroluminescentes, etc.). Toutefois, on peut noter une étude réalisée par Otakeno et al. [2002], dans le domaine de la simulation de vol et axée sur la détection de l'inclinaison en roulis. Otakeno et al. [2002] ont étudié, sur simulateur de désorientation spatiale, l'influence de différentes scènes visuelles, représentant un paysage de jour, de nuit ou un écran blanc sans projection visuelle, sur l'angle seuil de détection de l'inclinaison. Leur étude a montré un seuil moyen de détection de l'inclinaison en roulis (physique) de 2 degrés, quelle que soit la condition visuelle testée. Bien que la stimulation sensorielle sur simulateur moto diffère sensiblement de celle produite sur simulateur de désorientation spatiale (e.g., production de force centrifuge jusqu'à 2,2 g), notre étude corrobore la valeur du seuil indiquée par Otakeno et al. [2002] et relativise le rôle du roulis visuel dans la détection de l'inclinaison.

#### ***Effet robuste de la vitesse de roulis sur le temps de réponse et sur l'angle au moment de la réponse***

Principalement attendu, ces résultats sont similaires à ceux obtenus lors de l'expérience 1. Pour une discussion complète de l'effet de ce facteur (la vitesse de roulis) sur le temps de réponse et l'angle au moment de la détection de l'inclinaison, nous renvoyons le lecteur à la discussion de l'expérience 1 (chapitre 7, p. 118). Néanmoins, alors que l'angle au moment de la réponse augmentait à partir de la vitesse de 2 deg.s<sup>-1</sup> (en dessous de cette vitesse l'angle semblait constant) pour l'expérience 1, pour cette étude l'angle au moment de la réponse restait constant jusqu'à la vitesse de 2 deg.s<sup>-1</sup>, et n'augmentait avec la vitesse de roulis qu'à partir de 4 deg.s<sup>-1</sup>. Ce résultat peut être expliqué par les différences de vitesses de roulis physique présentées en raison du gain implémenté dans le modèle de restitution de roulis, les vitesses de roulis physique pour cette étude étant inférieures à celles pratiquées lors de l'expérience 1. Ces résultats corroborent toutefois ceux trouvés dans l'expérience 1 et suggèrent que les participants s'appuient sur les organes otolithiques pour détecter un changement d'orientation par rapport à la gravité, et ce même si les canaux semi-circulaires détectent une accélération angulaire à ces basses vitesses. En revanche, à plus hautes vitesses, lorsque le temps de réponse ne diminue plus de manière significative (et que l'angle au moment de la réponse augmente en conséquence), les résultats de cette expérience, comme ceux de l'expérience 1, suggèrent que les participants ont répondu à la détection en s'appuyant principalement sur la cinématique du mouvement (détectée par les canaux semi-circulaires) et non sur le changement de position par rapport à la verticale gravitaire.

#### **Perception de la chute**

Les résultats ont montré que la probabilité de chute la plus faible se situait entre les vitesses de roulis de 4,77 deg.s<sup>-1</sup> (vitesse à laquelle la probabilité de détecter passe sous le seuil de .50 pour le groupe « transition négative ») et 34,48 deg.s<sup>-1</sup> (vitesse jusqu'à laquelle la probabilité de détecter reste sous le seuil

de .50 pour le groupe « transition positive »). Toutefois, la vitesse de roulis global étant partagée entre le roulis visuel et physique, la plage de mouvement de la plate-forme mobile correspondant à la probabilité de chute la plus faible se situe donc entre les vitesses 2,22 et 16,04 deg.s<sup>-1</sup>. On peut noter que cette plage de mouvement est proche de celle mise en évidence en expérience 1, qui s'étendait entre les vitesses de roulis 6,87 et 15,14 deg.s<sup>-1</sup>.

En parallèle, les résultats sur l'angle de roulis seuil ont montré que l'angle de roulis global seuil auquel les participants des deux groupes pointés par la régression logistique déclarent se sentir chuter est de 24,99 degrés, celui-ci étant partagé entre le roulis visuel (13,37 degrés) et physique (11,63 degrés). Il est également intéressant de noter que l'angle moyen minimum de roulis physique est supérieur à celui trouvé lors de l'expérience 1, qui était de 8,51 degrés. Cette différence de résultat peut provenir des ressources attentionnelles mises en œuvre lors de ces deux expériences. Des ressources attentionnelles plus élevées peuvent diminuer l'attention portée au mouvement [Gundry, 1977] et donc celle portée à la chute en produisant un ressenti plus tardif. En effet, la présence d'un retour visuel dans cette étude plaçait les conducteurs en activité de conduite 'passive' alors que lors de l'expérience 1, les participants faisaient face à un écran blanc ; les stimulations visuelles et attentionnelles étaient ainsi très différentes.

Finalement, la fonction logistique, en dégageant quatre modalités différentes de réponse, a mis en évidence une forte hétérogénéité dans le ressenti de la chute. Un groupe a ressenti qu'il tombait seulement sur quelques essais, alors qu'à l'opposé un groupe a ressenti systématiquement une sensation de chute quelle que soit la vitesse d'inclinaison. En revanche, pour les deux groupes restants, l'un a perçu une sensation de chute de plus en plus fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis alors que l'autre groupe a ressenti le plus fréquemment une chute aux vitesses les plus faibles. Différentes hypothèses ont été proposées en discussion de l'expérience 1 (p. 120) pour expliquer cette importante hétérogénéité au niveau des réponses à la perception de la chute. Parmi ces hypothèses, l'expérience de conduite s'était révélée être un candidat potentiel d'explication de ces différents patterns de réponse. Brièvement, nous supposons que les participants du groupe « ne répond jamais » seraient les individus ayant le plus d'expérience de conduite motocycliste. À l'inverse, nous supposons que les participants ayant le moins d'expérience de conduite seraient les conducteurs ressentant le plus fréquemment une sensation de chute. Ceux-ci composeraient ainsi principalement les groupes d'individus qui répondent se sentir chuter : les groupes « répond toujours », « transition positive » et « transition négative ». Une ANOVA sur le nombre moyen d'années de permis moto avec comme facteur interindividuel le groupe mis en évidence par la fonction logistique a été réalisée afin de vérifier cette hypothèse sur les données de cette expérience. L'ANOVA réalisée sur le nombre moyen d'années de permis moto, n'a pas révélé d'effet du facteur groupe ( $p > .10$ ). Toutefois, au vu du nombre limité de données par groupes (groupes de 2 à 5 participants), cette variable nécessite d'être évaluée dans de prochaines études avec une population plus importante.

## **10.4 Expérience 4B : Couplage préférentiel « Même Direction »**

### **10.4.1 Participants**

Sur la base du pré-test, huit motocyclistes (6 hommes et 2 femmes, âge moyen = 40,3 ans ; ET = 8,4 ans ; nombre moyen d'années de permis = 15 ans, ET = 10,9 ans ; nombre moyen de kilomètres par an = 14438 km/an, ET = 4762 km/an) ont été assignés au groupe ayant pour couplage préférentiel une inclinaison du visuel dans la même direction que le sens du virage.

## 10.4.2 Plan expérimental

Dans cette expérience, le couplage entre le roulis visuel et le roulis physique présenté était celui identifié lors du pré-test, impliquant une inclinaison de l'horizon visuel dans la même direction que le sens du virage (dit couplage « même direction »). Dans cette étude, ont ainsi été manipulés la vitesse d'inclinaison en roulis et le côté d'inclinaison. Les deux directions d'inclinaison ont été utilisées comme précédemment.

Sept vitesses différentes de roulis ont été utilisées pour la tâche de détection du mouvement et de l'inclinaison (0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8 et 12 deg.s<sup>-1</sup>) et pour la tâche de perception de la chute (1, 2, 4, 8, 16, 32 et 48 deg.s<sup>-1</sup>). Les vitesses de roulis global présentées ci-dessus étaient partagées entre le roulis visuel et le roulis physique selon la valeur du gain moyen identifié en expérience 3 (gain de 1,15). Les valeurs de vitesses de roulis visuel et physique pour cette condition de couplage sont présentées dans le tableau 10.1 (les valeurs de roulis pour ce couplage étant identiques à celles du couplage « direction opposée » étudié dans l'expérience 4A).

Pour chacune des tâches, le plan expérimental 7 vitesses x 2 côtés d'inclinaison résultait en 14 conditions expérimentales différentes.

## 10.4.3 Procédure

Pour la tâche proprement dite, les participants devaient effectuer 3 essais par condition expérimentale. Cela résultait, en un total de 42 essais pour la tâche de détection du mouvement et de l'inclinaison (répartis en 2 blocs de 21 essais), et de 84 essais également pour la tâche de perception de la chute (répartis en 2 blocs de 21 essais).

L'ordre de passation des tâches était contrebalancé entre les participants. A l'intérieur des deux blocs, la vitesse de roulis et le côté d'inclinaison était présenté de façon aléatoire. Une pause était observée entre chaque bloc d'essais, et au moment du changement de tâche. La session complète a duré 1 h approximativement.

## 10.4.4 Analyse des données

Comme dans les expériences précédentes, pour la tâche de détection du mouvement, la mesure a porté sur le temps de réponse. Pour la tâche de détection de l'inclinaison, les mesures ont porté sur le temps de réponse et sur l'angle d'inclinaison de roulis global au moment de cette réponse. Pour la tâche de perception de la chute, les réponses de perception ont été traitées à partir de la fonction logistique afin d'identifier la vitesse de roulis à laquelle la transition entre percevoir et ne pas percevoir s'opère et la pente de la courbe. L'angle de roulis global au moment de la réponse a également été mesuré.

Ces différentes variables dépendantes ont été analysées à partir d'une ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison. Le niveau de significativité a été fixé à 0,05 pour toutes les analyses statistiques. La taille de l'effet ( $\eta^2$ ) est également rapportée. Lorsque nécessaire, le test post-hoc de Newman-Keuls a été utilisé afin de déterminer les différences significatives.

## 10.4.5 Résultats

Pour l'ensemble des tâches, l'ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison n'a révélé aucun effet principal ou d'interaction du facteur Côté d'inclinaison sur les différentes variables dépendantes retenues. Par

conséquent, les analyses détaillées ci-dessous ont été conduites sur l'ensemble des essais sans distinction du côté d'inclinaison

#### 10.4.5.1 Détection du mouvement

L'ANOVA à mesures répétées à une voie (7 vitesses de roulis) sur le temps de réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(6, 42) = 11.19, p < .001, \eta^2 = .62$ . Le test post-hoc sur l'effet principal de la vitesse de roulis a révélé une diminution significative du temps de réponse avec l'augmentation de la vitesse de roulis. Plus précisément, le temps de réponse à la vitesse de  $0,25 \text{ deg.s}^{-1}$  était supérieur par comparaison aux autres vitesses. D'autre part, à partir de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ , aucune différence significative n'est apparue entre les vitesses de roulis plus élevées (1, 2, 4, 8 et  $12 \text{ deg.s}^{-1}$ ).

#### 10.4.5.2 Détection de l'inclinaison

L'ANOVA à mesures répétées à une voie (7 vitesses de roulis) sur le temps de réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(6, 42) = 11.98, p < .001, \eta^2 = .63$ . Le test post-hoc sur l'effet principal de la vitesse de roulis a révélé une diminution significative du temps de réponse avec l'augmentation de la vitesse de roulis. Plus précisément, le temps de réponse à la vitesse de  $0,25 \text{ deg.s}^{-1}$  était supérieur aux autres vitesses. D'autre part, à partir de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ , aucune différence significative n'est apparue entre les vitesses de roulis plus élevées (1, 2, 4, 8 et  $12 \text{ deg.s}^{-1}$ ).

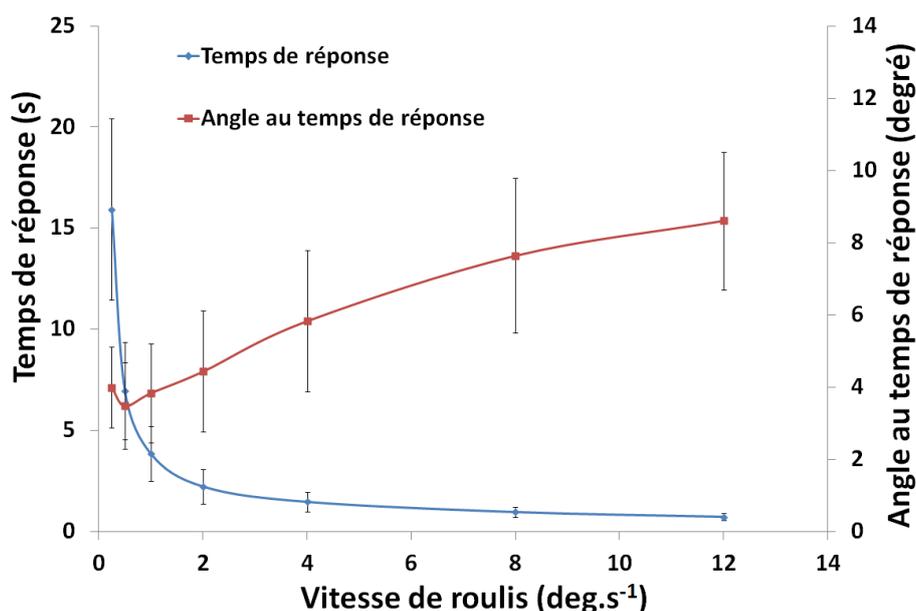


FIGURE 10.6 – Temps de réponse (s) et angle de roulis global au temps de réponse (degré) en fonction de la vitesse de roulis. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

L'ANOVA à mesures répétées sur l'angle de roulis global au moment de la réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(6, 42) = 15.94, p < .001, \eta^2 = .69$ . Les résultats ont indiqué une absence de différence significative entre les vitesses allant de  $0,25$  à  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ , mais une augmentation avec la vitesse de roulis de l'angle d'inclinaison au moment de la réponse à partir de  $4 \text{ deg.s}^{-1}$ . L'ensemble des données obtenues est présenté dans la figure 10.6.

### 10.4.5.3 Perception de la chute

Une première représentation des résultats (pourcentage de réponse positive, *i.e.*, chute perçue, en fonction de la vitesse de roulis) a permis de mettre en évidence différents patterns de réponse (figure 10.7) :

- Un groupe de participants ( $n = 4$ ) a répondu systématiquement ressentir une sensation de chute, et ce quelle que soit la vitesse de roulis (groupe « *répond toujours* »).
- Un groupe de participants ( $n=3$ ) a perçu une sensation de chute de moins en moins fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis. La régression logistique, réalisée indépendamment de la direction de l'inclinaison, a mis en évidence pour ce groupe une transition entre ne pas percevoir et percevoir la chute pour une vitesse seuil de  $5,59 \text{ deg.s}^{-1}$  ( $ET = 2,20 \text{ deg.s}^{-1}$ ). Ce résultat indique que ce groupe a ressenti une chute dans 50 % des cas jusqu'à une vitesse seuil de  $5,59 \text{ deg.s}^{-1}$ . L'analyse de régression logistique a d'autre part révélé, pour ce groupe, une pente négative (pente de  $-1,00 \text{ deg.s}^{-1}$  à la vitesse seuil ;  $ET = 1,68 \text{ deg.s}^{-1}$ ) compte tenu du pattern de réponse (groupe nommé « *transition négative* »).
- Un participant, malgré deux réponses positives (sur 42 essais), n'a pas ressenti de chute.

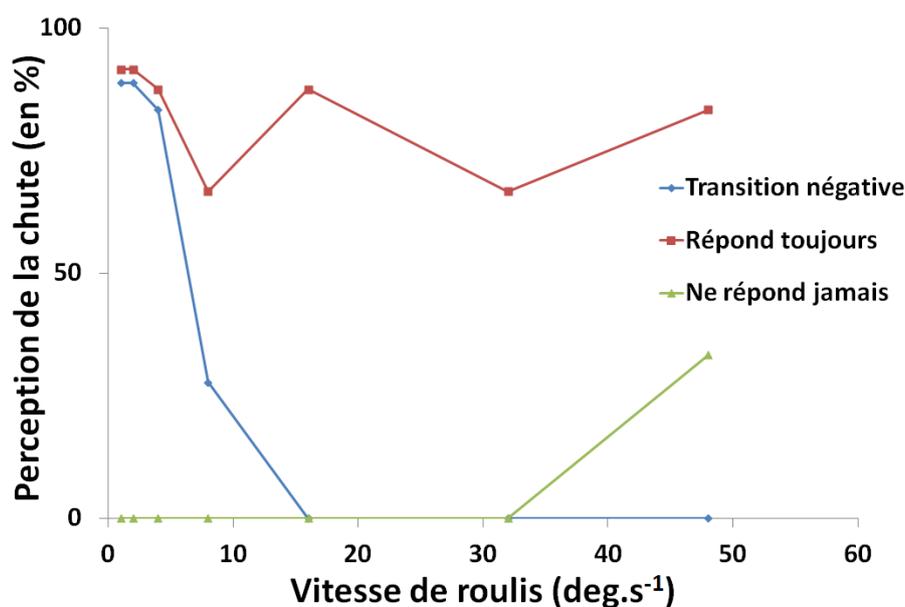


FIGURE 10.7 – Pourcentage de perception de la chute en fonction de la vitesse de roulis et des trois principaux patterns de réponse mis en évidence par la fonction logistique.

En parallèle, nous nous sommes également intéressés à l'angle de roulis global au moment de la réponse. Pour le groupe « *transition négative* », nous avons calculé l'angle de roulis global « seuil » correspondant à la vitesse de transition (au .50) déterminée par la fonction logistique. A cette fin, une fonction logarithmique a été dressée à partir des valeurs d'angles de roulis global obtenues pour chaque réponse donnée en fonction de la vitesse d'inclinaison. L'angle de roulis global « seuil » a alors été calculé à partir de l'équation de la régression et de la vitesse de transition seuil déterminée précédemment par la fonction logistique (le .50). L'ensemble des données obtenues est présenté dans le tableau 10.4 pour le groupe « *transition négative* » et le tableau 10.5 pour le groupe « *répond toujours* ».

**TABLE 10.4** – Moyenne des angles de roulis global seuil (somme des angles de roulis visuel et physique, en degré) correspondant à la vitesse de transition (au .50 déterminé par la fonction logistique) pour le groupe « transition négative ».

Pattern de réponse	Couplage « même direction » (gain de 1,15)			
		Angles de roulis seuil (degré)		
		Global	Visuel	Physique
Groupe « transition négative »	M	24,76	13,24	11,51
	ET	3,27	1,75	1,52

Note : M = moyenne, ET = écart type.

**TABLE 10.5** – Angles moyens de roulis (degré) au moment de la perception de la chute en fonction de la vitesse d'inclinaison, pour le groupe « répond toujours ».

Pattern de réponse		Vitesses de roulis ( deg.s <sup>-1</sup> )							
		1	2	4	8	16	32	48	
Groupe « répond toujours »	Roulis global	M	22,91	23,53	24,45	24,97	26,11	24,75	25,71
		ET	3,07	2,26	1,94	3,84	1,58	3,86	2,46
	Roulis visuel	M	12,25	12,59	13,08	13,35	13,96	13,24	13,75
		ET	1,64	1,21	1,04	2,06	0,85	2,07	1,32
	Roulis physique	M	10,65	10,95	11,37	11,61	12,14	11,51	11,96
		ET	1,43	1,05	0,90	1,79	0,74	1,80	1,14

Note : M = moyenne, ET = écart type.

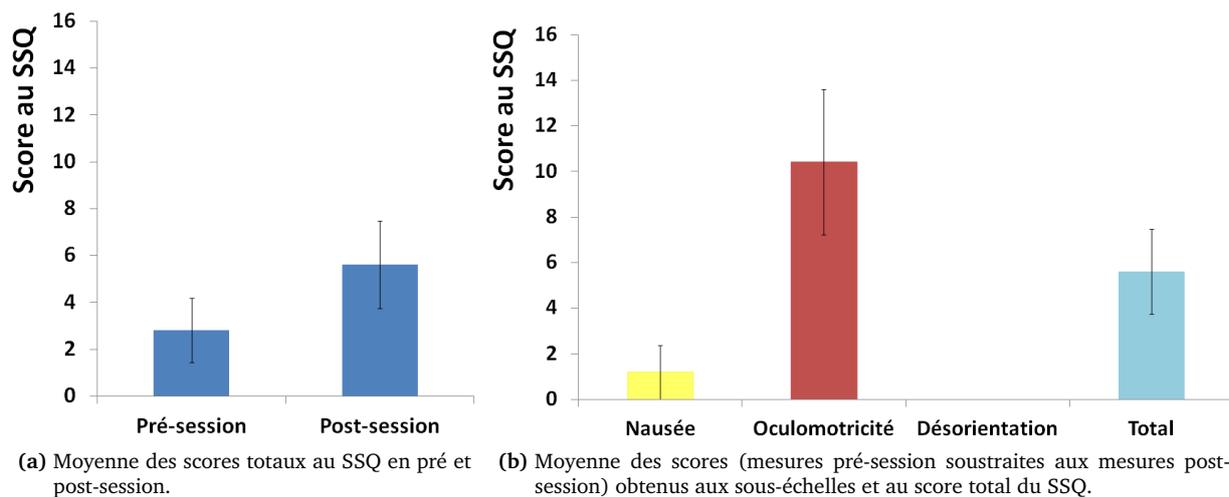
#### 10.4.5.4 Scores au SSQ

Le mal du simulateur a été évalué à l'arrivée des participants et à la fin de la session expérimentale au moyen du SSQ. D'un point de vue descriptif, nous pouvons constater que les scores (calculés en soustrayant les mesures pré-expérimentales des mesures post-expérimentales) obtenus aux différentes sous-échelles sont assez faibles (figure 10.8b), les scores maximaux aux différentes sous-échelles approchant approximativement 200 points.

Afin d'investiguer l'effet simulateur, un test *t* de Student a été appliqué sur le score total obtenu en pré et post-session. Les résultats n'ont pas révélé d'effet simulateur sur le score total (figure 10.8a),  $t(7) = -1,34, p = 0,22$  (M = 2,81 et 5,61, ET = 3,87 et 5,29, pour respectivement les scores totaux obtenus en pré-session et post-session).

#### 10.4.6 Discussion

L'objectif de cette étude était de déterminer, pour leur couplage préférentiel, les caractéristiques du mouvement du roulis pour lesquelles les utilisateurs détectent ce mouvement ainsi que celles pour lesquelles ils détectent l'inclinaison sans toutefois ressentir de chute. Nous avons, ainsi, exploré comment certains facteurs, tels que le côté et la vitesse d'inclinaison influençaient la détection. Tout d'abord, les résultats n'ont indiqué aucun effet de la direction d'inclinaison que ce soit sur la perception du mouvement, de l'inclinaison ou de la chute. Cette absence d'effet est en accord avec les résultats des expériences précédentes et des études de la littérature [Benson et Brown, 1989; Gundry, 1978]. Les résultats ont montré que le mal du simulateur n'avait pas été ressenti au cours de cette étude, les scores rapportés par les participants étaient relativement faibles. Les résultats ont en revanche indiqué un effet



**FIGURE 10.8** – Le mal du simulateur. Les scores maximaux sont de 200,34 pour la sous-échelle *nausée*, de 159,18 pour *l'oculomotricité*, de 292,32 pour la *désorientation* et de 235,62 pour le *score total* au questionnaire. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

robuste de la vitesse de roulis sur les trois « seuils » de détection. Comme pour l'expérience 4A, une forte hétérogénéité a été révélée au niveau des patterns de réponse à la perception de la chute.

### Détection du mouvement

Les résultats relatifs à la détection du mouvement ont indiqué un effet de la vitesse de roulis sur les réponses des participants : plus la vitesse de roulis augmente, plus le temps de détection du mouvement diminue. Nos résultats semblent également indiquer que cette détection du mouvement atteint un plateau (asymptote) à partir de la vitesse de  $0,5 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$ , le temps mis pour détecter le mouvement ne se différenciant plus de façon significative au-delà de cette vitesse. Principalement attendu, ces résultats sont identiques à ceux obtenus lors de l'expérience 1 et 4A. Pour une discussion complète de l'effet de ce facteur sur le temps de réponse et l'angle au moment de la détection de l'inclinaison, nous renvoyons le lecteur à la discussion de l'expérience 1 (section 7.4)

### Détection de l'inclinaison

Les résultats de la tâche de détection de l'inclinaison ont mis en évidence un angle de roulis global moyen minimum de détection de 3,98 degrés ( $\pm 2,13$  degrés). Toutefois, il est à noter que l'angle de roulis global seuil est partagé entre un angle de roulis visuel (de 2,13 degrés) et un angle roulis physique (de 1,85 degrés). Cette valeur d'angle de roulis global est en adéquation avec l'angle trouvé en expérience 4A impliquant une condition de couplage différente (l'inclinaison du roulis visuel s'effectuant dans la direction opposée). De plus, l'angle de roulis physique seuil est également proche de ceux rapportés dans la littérature [Gundry, 1978; Otakeno et al., 2002; Young, 1984] et des deux premières expériences, qui se situent autour de 2 degrés. Comme pour l'expérience 4A, ce résultat suggère que les participants ont détecté l'inclinaison à partir d'un certain angle de roulis physique, et qu'ils ont donc basés leur détection principalement sur le roulis physique plutôt que sur le roulis visuel.

D'autre part, un effet robuste de la vitesse de roulis a été indiqué dans cette tâche de détection de l'inclinaison. Plus la vitesse de roulis augmente, plus le temps de réponse diminue et plus l'angle au moment de la réponse augmente. Toutefois, les résultats ont souligné l'apparition d'un plateau à partir

de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ , le temps de réponse ne diminuant plus de manière significative au-delà de cette vitesse. En revanche, les résultats ont montré que l'angle au moment de la réponse augmentait de manière significative à partir de la vitesse de roulis de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ . En deçà de cette vitesse de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ , l'angle au moment de la réponse n'apparaît pas augmenter significativement. Principalement attendu, ces résultats sont identiques à ceux obtenus lors de l'expérience 1 et 4A. Pour une discussion complète de l'effet de ce facteur sur le temps de réponse et l'angle au moment de la détection de l'inclinaison, nous renvoyons le lecteur à la discussion de l'expérience 1 (section 7.4, p. 118).

## Perception de la chute

Les résultats ont mis en évidence que, pour cette condition de couplage préférentiel, la probabilité de perception de la chute la plus faible se situait au-delà de la vitesse de roulis global de  $5,59 \text{ deg.s}^{-1}$ . Par conséquent, la plage de mouvement de la plate-forme mobile correspondant à la probabilité de chute la plus faible se situait entre les vitesses de roulis physique de  $2,60 \text{ deg.s}^{-1}$  et  $48 \text{ deg.s}^{-1}$  (vitesse maximum de la plate-forme mobile). On peut noter que cette plage de mouvement est plus large que celle mise en évidence en expérience 1 et 4A, qui s'étendait, respectivement, entre les vitesses de roulis physique  $6,87$  et  $15,14 \text{ deg.s}^{-1}$ , et  $2,22$  et  $16,04 \text{ deg.s}^{-1}$ . Toutefois, bien que ce résultat puisse s'expliquer par des différences au niveau des vitesses de roulis physique testées en comparaison à l'expérience 1, ces dernières étaient identiques à l'expérience 4A.

En parallèle, les résultats ont montré que l'angle moyen de roulis global seuil auquel les participants des deux groupes mis en évidence par la fonction logistique (groupes « transition négative » et « répond toujours ») déclarent se sentir chuter est de  $24,7$  degrés, cet angle étant partagé entre le roulis visuel ( $13,21$  degrés) et physique ( $11,49$  degrés). Ces valeurs sont en adéquation avec celles trouvées en expérience 4A (angle de roulis physique de  $11,67$  degrés), ce qui suggère que la direction d'inclinaison de roulis visuel ne semble pas influencer le seuil de perception de la chute.

Finalement, la fonction logistique en dégageant trois modalités différentes de réponse a mis en évidence une forte hétérogénéité dans le ressenti de la chute. Un groupe a ressenti systématiquement une sensation de chute quelle que soit la vitesse d'inclinaison alors qu'un second groupe de participant a perçu une sensation de chute de moins en moins fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis. En revanche, le participant restant n'a pas ressenti de sensation de chute. Différentes hypothèses ont été proposées en discussion de l'expérience 1 (p. 120) pour expliquer cette importante hétérogénéité. Le nombre de participant par groupe étant très limité, ces hypothèses n'ont pas pu être étudiées pour cette expérience.

## 10.5 Expérience 4C : Couplage préférentiel « Horizon Stationnaire

»

### 10.5.1 Participants

Sur la base du pré-test, cinq motocyclistes (5 hommes, âge moyen =  $38,6$  ans ;  $ET = 6,9$  ; nombre moyen d'années de permis =  $12,2$  ans,  $ET = 7,9$  ans ; nombre moyen de kilomètres par an =  $16100$  km/an,  $ET = 16017$  km/an) ont été assignés au groupe ayant pour couplage préférentiel un horizon visuel ne s'inclinant pas.

### 10.5.2 Plan expérimental

Dans cette expérience, le couplage entre le roulis visuel et le roulis physique présenté était le couplage préférentiel n'impliquant pas d'inclinaison de l'horizon visuel (dit couplage « horizon stationnaire »). Dans cette étude, ont ainsi été manipulés seulement la vitesse d'inclinaison en roulis et le côté d'inclinaison. Les deux directions d'inclinaison ont été utilisées comme précédemment. Sept vitesses différentes de roulis ont été utilisées pour la tâche de détection du mouvement et de l'inclinaison (0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8 et 12 deg.s<sup>-1</sup>) ainsi que pour la tâche de perception de la chute (1, 2, 4, 8, 16, 32 et 48 deg.s<sup>-1</sup>).

Pour chacune des tâches, le plan expérimental 7 vitesses x 2 côtés d'inclinaison résultait en 14 conditions expérimentales différentes.

### 10.5.3 Procédure

Pour la tâche proprement dite, les participants devaient effectuer 3 essais par condition expérimentale. Cela résultait, en un total de 42 essais pour la tâche de détection du mouvement et de l'inclinaison (répartis en 2 blocs de 21 essais), et de 42 essais pour la tâche de perception de la chute (répartis également en 2 blocs de 21 essais). L'ordre de passation des tâches était contrebalancé entre les participants. A l'intérieur des deux blocs, la vitesse de roulis et le côté d'inclinaison était présenté de façon aléatoire. Une pause était observée entre chaque bloc d'essais, et au moment du changement de tâche. La session complète a duré 1 h approximativement.

### 10.5.4 Analyse des données

Comme pour les expériences précédentes, pour la tâche de détection du mouvement, la mesure a porté sur le temps de réponse. Pour la tâche de détection de l'inclinaison, les mesures ont porté sur le temps de réponse et sur l'angle d'inclinaison du roulis global au moment de cette réponse. Pour la tâche de perception de la chute, les réponses de perception ont été traitées à partir de la fonction logistique afin d'identifier la vitesse de roulis à laquelle la transition entre percevoir et ne pas percevoir s'opère et la pente de la courbe. L'angle de roulis global au moment de la réponse a également été mesuré.

Ces différentes variables dépendantes ont été analysées à partir d'une ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison. Le niveau de significativité a été fixé à 0,05 pour toutes les analyses statistiques. La taille de l'effet ( $\eta^2$ ) est également rapportée. Lorsque nécessaire, le test post-hoc de Newman-Keuls a été utilisé afin de déterminer les différences significatives.

### 10.5.5 Résultats

Pour l'ensemble des tâches, l'ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison n'a révélé aucun effet principal ou d'interaction du facteur Côté d'inclinaison sur les différentes variables dépendantes retenues. Par conséquent, les analyses détaillées ci-dessous ont été conduites sur l'ensemble des essais sans distinction du côté d'inclinaison

#### 10.5.5.1 Détection du mouvement

L'ANOVA à mesures répétées à une voie (7 Vitesses de roulis) sur le temps de réponse a révélé que l'effet principal de la vitesse de roulis approchait le seuil de significativité,  $F(6, 24) = 2.45, p = .05, \eta^2 = .38$ , suggérant que le temps de réponse à la vitesse de 0,25 deg.s<sup>-1</sup> était supérieur par comparaison aux autres vitesses.

### 10.5.5.2 Détection de l'inclinaison

L'ANOVA à mesures répétées à une voie (7 Vitesses de roulis) sur le temps de réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(6, 24) = 7.67, p < .001, \eta^2 = .65$ . Le test post-hoc sur l'effet principal de la vitesse de roulis a révélé une diminution significative du temps de réponse avec l'augmentation de la vitesse de roulis. Plus précisément, le temps de réponse à la vitesse de  $0,25 \text{ deg.s}^{-1}$  était supérieur par comparaison aux autres vitesses. D'autre part, à partir de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ , aucune différence significative n'est apparue entre les vitesses de roulis plus élevées (1, 2, 4, 8 et  $12 \text{ deg.s}^{-1}$ ).

L'ANOVA sur l'angle de roulis global au moment de la réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(6, 24) = 46.46, p < .001, \eta^2 = .92$ . Les résultats ont indiqué une absence de différence significative entre les vitesses allant de  $0,25$  à  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ , mais une augmentation, avec la vitesse de roulis, de l'angle d'inclinaison au moment de la réponse à partir de  $4 \text{ deg.s}^{-1}$ . L'ensemble des données obtenues est présenté dans la figure 10.9.

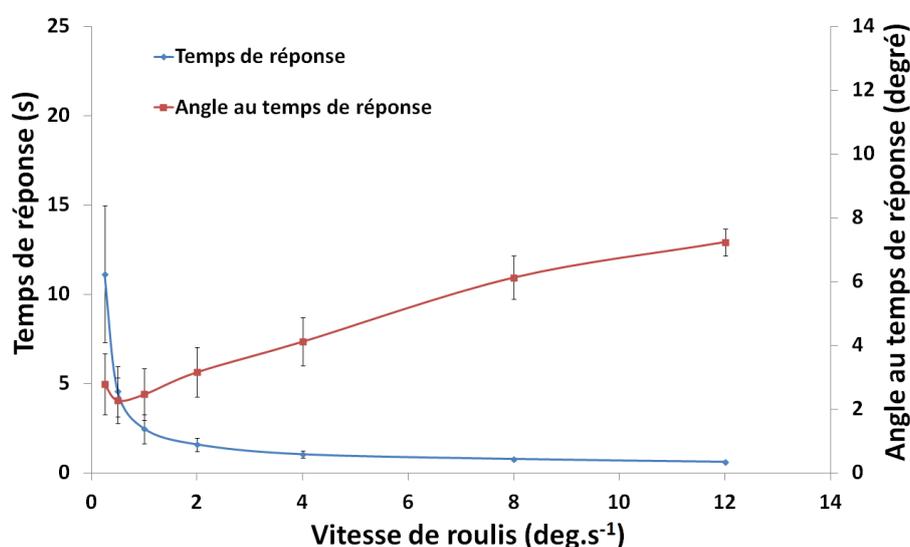


FIGURE 10.9 – Temps de réponse (s) et angle au temps de réponse (degré) en fonction de la vitesse de roulis. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

### 10.5.5.3 Perception de la chute

Une première représentation des résultats (pourcentage de réponse positive, *i.e.*, chute perçue, en fonction de la vitesse de roulis ; voir la figure 10.10) a permis de mettre en évidence différents patterns de réponse :

- Un groupe de participants ( $n=2$ ) a perçu une sensation de chute de moins en moins fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis pour l'ensemble des conditions de couplage entre le roulis visuel et le roulis physique. La régression logistique, réalisée pour chaque condition de couplage mais indépendamment de la direction de l'inclinaison, a mis en évidence pour ce groupe une transition entre ne pas percevoir et percevoir la chute pour une vitesse seuil de  $2,48 \text{ deg.s}^{-1}$  ( $ET = 1,87 \text{ deg.s}^{-1}$ ). Ce résultat indique que ce groupe a ressenti une chute dans 50 % des cas jusqu'à une vitesse seuil de  $2,48 \text{ deg.s}^{-1}$ . L'analyse de régression logistique a d'autre part révélé, pour ce groupe, une pente négative (pente de  $-2,31 \text{ deg.s}^{-1}$  à la vitesse seuil ;  $ET = 0,18 \text{ deg.s}^{-1}$ ) compte tenu du pattern de réponse (groupe nommé « *transition négative* »).

- Un second groupe de participants (n=3) a montré un pattern de réponse opposé, la probabilité de percevoir une chute augmentant avec l'augmentation de la vitesse. La régression logistique a mis en évidence pour ce groupe une vitesse seuil de 35,43 deg.s<sup>-1</sup> (ET = 10,11 deg.s<sup>-1</sup>) pour une pente positive de 1,18 deg.s<sup>-1</sup> (ET = 0,88 deg.s<sup>-1</sup>) à cette vitesse (groupe nommé « transition positive »). Ce résultat indique donc que, à partir d'une vitesse de roulis de 35,43 deg.s<sup>-1</sup> en moyenne, ces participants ont ressenti une sensation de chute dans 50 % des cas.

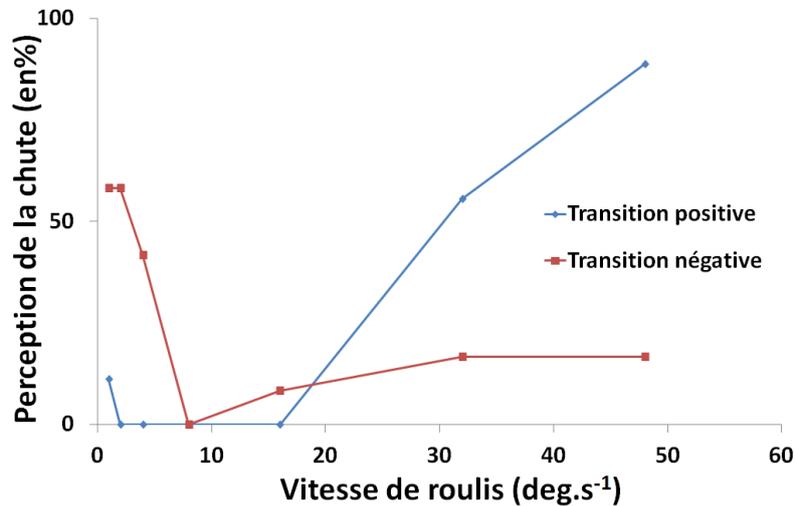


FIGURE 10.10 – Pourcentage de perception de la chute en fonction de la vitesse de roulis et des deux patterns de réponse mis en évidence par la fonction logistique.

Enfin, nous nous sommes intéressés à l'angle de roulis global au moment de la réponse. Pour chaque participant des groupes « transition positive » et « transition négative », nous avons calculé l'angle de roulis global « seuil » correspondant à la vitesse de transition (au .50) déterminée par la fonction logistique. A cette fin, une fonction logarithmique a été dressée à partir des valeurs d'angles de roulis global obtenues pour chaque réponse donnée en fonction de la vitesse d'inclinaison. L'angle de roulis global « seuil » a alors été calculé à partir de l'équation de la régression et de la vitesse de transition seuil déterminée précédemment par la fonction logistique (le .50).

Les angles de roulis global seuil pour chacun des groupes « transition positive » et « transition négative » sont présentés dans le tableau 10.6. D'un point de vue descriptif, on peut constater que les participants ont perçu une sensation de chute relativement tard, à un angle dépassant les 12 degrés d'inclinaison.

TABLE 10.6 – Moyenne des angles de roulis global seuil (en degré) correspondant à la vitesse de transition (au .50 déterminé par la fonction logistique), pour les groupes « transition négative » et « transition positive ».

Pattern de réponse à la chute	Couplage « Horizon stationnaire » Angle de roulis seuil (degré)	
	M	ET
Groupe « transition négative »	M	12,13
	ET	0,44
Groupe « transition positive »	M	12,30
	ET	0,18

Note : M = moyenne, ET = écart-type. Les angles de roulis global mesurés correspondent aux angles de roulis physique puisqu'aucun roulis visuel n'était rendu.

#### 10.5.5.4 Scores au SSQ

Le mal du simulateur a été évalué à l'arrivée des participants et à la fin de la session expérimentale au moyen du SSQ. D'un point de vue descriptif, nous constatons que les scores (calculés en soustrayant les mesures pré-expérimentales des mesures post-expérimentales) obtenus aux différentes sous-échelles sont assez faibles (figure 10.11b), les scores maximaux aux différentes sous-échelles approchant approximativement 200 points. Afin d'investiguer l'effet simulateur, un test *t* de Student a été appliqué sur le score total obtenu au questionnaire. Les résultats n'ont pas révélé d'effet simulateur sur le score total (figure 10.11a),  $t(4) = -1,00, p = 0,37$  ( $M = 0,75$  et  $3,74$ ,  $ET = 1,67$  et  $8,36$ , pour respectivement les scores totaux obtenus en pré-session et post-session).

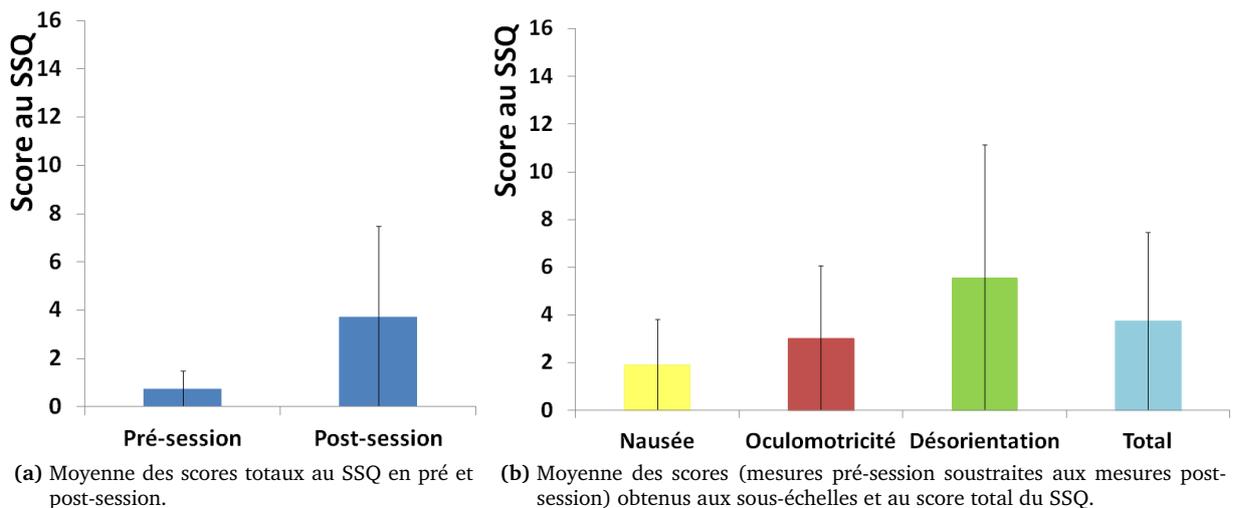


FIGURE 10.11 – Le mal du simulateur. Les scores maximaux sont de 200,34 pour la sous-échelle *nausée*, de 159,18 pour *l'oculomotricité*, de 292,32 pour la *désorientation* et de 235,62 pour le *score total* au questionnaire. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les barres d'erreurs importantes reflètent le fait qu'un seul sur les cinq participants ait déclaré des symptômes au SSQ, que ce soit en pré-session ou post-session.

#### 10.5.6 Discussion

Cette étude avait pour objectif de déterminer, pour une condition de couplage préférentiellement utilisée, les caractéristiques du mouvement du roulis pour lesquelles les utilisateurs détectent ce mouvement ainsi que celles pour lesquelles ils détectent l'inclinaison sans toutefois ressentir de chute. Nous avons, ainsi, exploré comment certains facteurs, tels que le côté et la vitesse d'inclinaison influençaient ces seuils de détection.

Tout d'abord, les résultats n'ont indiqué aucun effet de la direction d'inclinaison que ce soit sur la perception du mouvement, de l'inclinaison ou de la chute. Cette absence d'effet est en accord avec les résultats des expériences précédentes et des études de la littérature [Benson et al., 1989; Gundry, 1978]. Nos résultats ont montré que le mal du simulateur n'avait pas été mis en évidence au cours de cette étude, les scores rapportés par les participants étaient nuls ou relativement faibles. Les résultats ont en revanche indiqué un effet robuste de la vitesse de roulis sur les trois « seuils » de détection. Comme pour les expériences précédentes, différents patterns de réponse à la perception de la chute ont été révélés.

## Détection du mouvement

Les résultats relatifs à la détection du mouvement ont indiqué un effet de la vitesse de roulis : plus la vitesse de roulis augmente, plus le temps de détection du mouvement diminue et plus l'angle au moment de la réponse augmente. D'autre part, nos résultats semblent également indiquer que cette détection du mouvement atteint un plateau (asymptote) à partir de la vitesse de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ , le temps mis pour détecter le mouvement ne se différenciant plus de façon significative au-delà de cette vitesse. Principalement attendus, ces résultats sont identiques à ceux des expériences précédentes. Pour une discussion détaillée sur les capteurs impliqués lors de cette détection du mouvement, nous renvoyons le lecteur à la discussion de l'expérience 1 et 4A.

## Détection de l'inclinaison

Les résultats de la tâche de détection de l'inclinaison ont mis en évidence un angle de roulis global moyen minimum de détection de  $2,79$  degrés ( $\pm 2,14$  degrés), cet angle étant restitué uniquement par le roulis physique. Cet angle est, globalement, supérieur à ceux rapportés dans la littérature [Gundry, 1978; Otakeno et al., 2002; Young, 1984], qui se situent autour de  $2$  degrés, mais reste inférieur à l'angle de  $5$  degrés identifié par Bringoux et ses collègues [2002] lors d'une inclinaison en roulis réalisée avec une restriction des mouvements des sujets (maintenus par plusieurs harnais). Cet angle de roulis physique est en revanche supérieur aux angles de détection mis en évidence lors de l'expérience 1 (angle de roulis physique moyen de  $1,72$  degré), de l'expérience 4A et 4B pour une condition de couplage différente (angle moyen de  $2,15$  et  $1,85$  degrés, respectivement). Cependant, la variabilité interindividuelle est plus importante dans cette étude en comparaison aux expériences précédentes ( $ET = 0,65, 1,07$  et  $1,47$  degrés, pour respectivement les expériences 1, 4A et 4B). De plus, le nombre de participant est plus limité dans cette étude en comparaison aux études précédentes

D'autre part, un effet robuste de la vitesse de roulis a été découvert dans cette tâche de détection de l'inclinaison. Plus la vitesse de roulis augmente, plus le temps de réponse diminue et plus l'angle au moment de la réponse augmente. Toutefois, les résultats ont souligné l'apparition d'un plateau à partir de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ , le temps de réponse ne diminuant plus de manière significative au-delà de cette vitesse. Ces résultats étant identiques à ceux des expériences précédentes, pour une discussion approfondie de l'effet de la vitesse de roulis, sur le temps de réponse et de l'angle au moment de la détection de l'inclinaison, nous renvoyons le lecteur à la discussion de l'expérience 1 et 4A (p. 118 et 158).

## Perception de la chute

Les résultats ont mis en évidence que la plage de mouvement de la plate-forme mobile correspondant à la probabilité de chute la plus faible se situe entre les vitesses de roulis physique de  $2,48 \text{ deg.s}^{-1}$  (vitesse à laquelle la probabilité de détecter passe sous le seuil de  $.50$  pour le groupe « transition négative ») et  $35,43 \text{ deg.s}^{-1}$  (vitesse jusqu'à laquelle la probabilité de détecter reste sous le seuil de  $.50$  pour le groupe « transition positive »). En parallèle, l'angle moyen minimum seuil pour lesquels les participants des deux groupes mis en évidence par la régression logistique déclarent se sentir chuter est de  $12,22$  degrés ( $\pm 0,12$  degré). Cet angle est supérieur à celui mis en évidence lors de l'expérience 1, qui était de  $8,51$  degrés mais apparaît plus proche des angles de roulis physique identifiés lors des expériences 4A et 4B ( $11,63$  et  $11,49$  degrés, respectivement) qui mettaient en jeu une condition de couplage préférentiel différente impliquant la restitution de roulis visuel. Cette différence de résultats avec l'expérience 1 est déjà expliquée en discussion de l'expérience 4A.

D'autre part, comme pour les expériences précédentes, la fonction logistique en dégageant deux modalités différentes de réponse a mis en évidence une hétérogénéité dans le ressenti de la chute. Un groupe a ressenti une sensation de chute de moins en moins fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis, tandis que le second groupe a ressenti une sensation de chute de plus en plus fréquemment avec l'augmentation de la vitesse. Ces deux profils de réponse sont similaires à ceux identifiés lors des expériences précédentes. D'autre part, différentes hypothèses ont été proposées en discussion de l'expérience 1 (voir p. 120) pour expliquer cette importante hétérogénéité. Le nombre de participant par groupe étant très limité, ces hypothèses n'ont pas pu être étudiées pour cette expérience.

## 10.6 Conclusion

Cette étude a permis d'obtenir des premiers résultats investiguant l'influence d'un mouvement visuel couplé à un mouvement physique sur la sensibilité des individus au mouvement de roulis. Cette étude a été réalisée à partir de différents couplages préférentiels entre ces deux dimensions (visuelle et physique) qui n'ont engendré que des symptômes d'intensité légères du mal du simulateur. Ces premiers résultats ont montré tout d'abord que le roulis visuel ne semblait pas influencer les seuils de détection du mouvement et de l'inclinaison, les résultats étant relativement similaires entre les trois expériences de cette étude, impliquant chacune un couplage préférentiel différent entre le roulis visuel et physique, et ceux de l'expérience 1.

Toutefois, ce résultat peut s'expliquer, comme le suggère Otakeno et al. [2002], par un manque de réalisme de la scène visuelle projetée à l'écran et également par un champ de vision limité (champ visuel latéral de 72 degrés et vertical de 54 degrés). En effet, il est reconnu que la taille du champ de vision joue un rôle critique dans la perception du mouvement propre comme pour le contrôle postural [Kawakita et al., 2000], la sensation d'inclinaison [Allison et al., 1999] ou encore au niveau de la perception de la vitesse [Shahar et al., 2010; Pretto et al., 2009]. Un champ de vision horizontal d'au moins 120 degrés est ainsi considéré comme essentiel pour la validité de la simulation de conduite [Kemeny, 2001; Jamson, 2000]. Nous pouvons effectivement supposer que l'augmentation de la taille du champ de vision augmentera la sensibilité au mouvement de roulis grâce à un apport plus important des informations périphériques qui jouent un rôle important dans la perception du mouvement propre.

De même, pour la perception de la chute, les résultats concernant l'angle de roulis global seuil minimisent le rôle du roulis visuel et suggèrent que l'origine de la perception de la chute était principalement physique (perçu par le système proprioceptif et vestibulaire), puisque les angles de roulis physique seuil, correspondants aux angles de roulis global, étaient très proches entre les trois expériences de cette étude.

Finalement, nos résultats ont montré qu'une vitesse de roulis global minimale de  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$  est nécessaire pour qu'un mouvement de la moto soit ressenti immédiatement pendant la conduite, ce quel que soit le couplage préférentiel présenté. De plus, pour permettre une sensation d'inclinaison en situation de conduite par le mouvement du simulateur sans ressenti de chute, les stratégies de commandes devraient intégrer un angle moyen minimum de roulis physique de 2,26 degrés (angle moyen déterminé sur les trois expérimentations) et un angle maximum moyen de roulis physique de 11,5 degrés approximativement.



# Chapitre 11

## Expérience 5 : Influence de la taille du champ de vision horizontal sur la contribution du roulis visuel et physique à la production d'une illusion d'inclinaison crédible.

### 11.1 Motivation et problématique de l'étude

Parmi les nombreuses variables ayant le potentiel d'influencer toute simulation, la taille du champ de vision apparaît jouer un rôle déterminant. Les informations périphériques sont connues pour jouer un rôle essentiel dans la perception du mouvement propre. De nombreuses études se sont par ailleurs attachées à investiguer et démontrer l'influence de ce paramètre sur l'orientation spatiale, notamment au niveau du contrôle postural [Eriksson et von Hofsten, 2005; Kawakita et al., 2000; Streepey et al., 2007], mais aussi de la perception de la vitesse [Jamson, 2000; Pretto et al., 2009; Shahar et al., 2010] ou encore au niveau du comportement de conduite [Chatziastos et al., 1999; Kappé et al., 1999]. Par conséquent cette étude avait pour objectif de compléter et d'étendre les résultats de l'expérience 3 (voir chapitre 9) en investiguant l'influence de la taille du champ de vision sur les paramètres du modèle de restitution de roulis qui produisent, chez les motocyclistes, une illusion crédible d'inclinaison lors d'une prise de virage. Reprenant les bases de l'expérience 3, l'approche suivie nous permettait d'évaluer l'influence du champ de vision sur :

- 1) La proportion d'inclinaison réelle à restituer sur simulateur (comparativement aux inclinaisons rencontrées en situation réelle),
- 2) La répartition de cette inclinaison globale entre le roulis physique et visuel en fonction des conditions de conduite (angles d'inclinaison théorique, rayons de courbure),
- 3) Le rôle exact du roulis visuel dans l'illusion d'inclinaison,
- 4) La direction d'inclinaison du roulis visuel par rapport au virage préférentiellement utilisée par les participants.

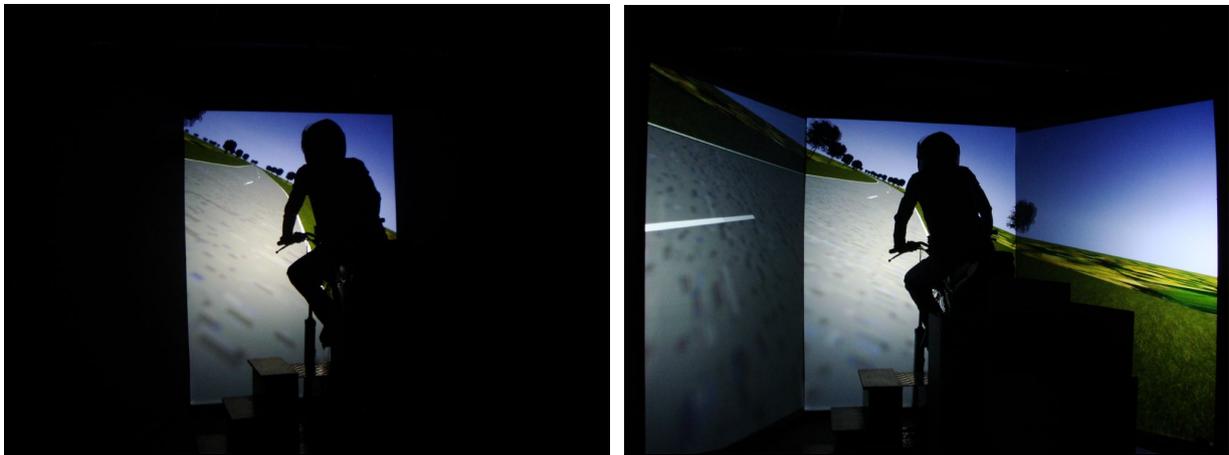
Sur la base du développement précédent et des résultats de l'expérience 3, nous pouvons supposer que, pour un champ de vision large, l'individu aura probablement besoin d'incliner moins la scène visuelle (que pour un champ de vision réduit) pour percevoir une illusion d'inclinaison aussi crédible puisque le participant dispose de plus d'informations renseignant sur son propre mouvement. Nous pouvons donc supposer que la proportion d'inclinaison réelle à restituer sur simulateur sera moins impor-

tante pour un champ de vision large que réduit. De même, nous pouvons supposer que le rapport entre le roulis visuel et physique (définissant la répartition de l'inclinaison globale entre les deux roulis) sera plus faible (se rapprochant de l'unité) dans la situation d'un champ de vision large par rapport à un champ de vision réduit. En revanche, sur la base des résultats de l'expérience 3 nous pouvons supposer que la taille du champ de vision n'aura pas d'effet sur le rôle du roulis visuel dans l'illusion d'inclinaison ni sur la direction d'inclinaison du roulis visuel préférentiellement utilisée par les participants, le rôle du roulis visuel semblant être lié à l'amplitude du roulis physique et en particulier à limiter l'utilisation de ce dernier.

## 11.2 Méthode

Le principe de l'expérience était identique à celui de l'expérience 3 (voir section 9.2) avec néanmoins quelques exceptions. Assis sur le simulateur et faisant face aux écrans à une distance de 1,63 m, les participants devaient, comme précédemment, ajuster le roulis visuel et/ou physique, à l'aide de boutons poussoirs, afin d'atteindre une sensation d'inclinaison en virage réaliste.

Ont été manipulés au cours de l'expérience l'angle d'inclinaison théorique d'une moto réelle (10, 20 ou 30 degrés), le rayon de courbure (150 ou 300 m) ainsi que la taille du champ visuel horizontal (60 ou 180 degrés). Pour cette dernière variable, la scène simulée était soit projetée par un projecteur 'Projection-design F-22' (1024 x 1280 de résolution) sur un écran de 1,88 m de large et 2,40 m de hauteur (sous-tendant un angle horizontal de 60 degrés, voir figure 11.1a), soit projetée sur 3 écrans de même dimension (sous-tendant alors un angle horizontal de 180 degrés, voir figure 11.1b), les 2 écrans latéraux formant un angle de 120 degrés avec l'écran central.



(a) Scène visuelle projetée sur un écran (condition champ de vision limité).

(b) Scène visuelle projetée sur trois écrans (condition champ de vision large).

FIGURE 11.1 – Dispositif de restitution visuelle.

Durant la session expérimentale, pour chaque condition de champ visuel, le plan expérimental résultait en 6 blocs (12 au total) de 4 essais (2 essais se terminant par un virage à gauche et 2 essais par un virage à droite), incluant un bloc pour chacune des 6 sous-conditions créées par le plan expérimental 3 x 2 (angles d'inclinaison théorique x rayons de courbure). La moitié des participants a complété la condition du champ de vision limité (1 écran) avant la condition champ de vision large (3 écrans), l'autre moitié procédant dans l'ordre inverse. La moitié de chacun de ces sous-groupes a complété la session

d'entraînement avec la condition champ de vision limité et l'autre moitié avec la condition champ de vision large. Pour chaque condition de champ de vision de la session expérimentale, les six blocs ont été présentés de manière aléatoire. Une pause de 10 min était observée entre les deux conditions de champ de vision. A l'arrivée, au moment du changement de condition de champ de vision et à la fin de la session expérimentale, les participants ont rempli le questionnaire du mal du simulateur (SSQ, *Simulator Sickness Questionnaire* ; Kennedy et al., 1993). La session complète durait approximativement 1h30.

### 11.2.1 Participants

Vingt-neuf motocyclistes (27 hommes et 2 femmes, âge moyen = 36 ans, ET = 8,1 ans ; nombre d'années de permis moto = 11,3 ans, ET = 8,9 ans ; nombre moyen de kilomètres par an = 16897 km/an, ET = 10658 km/an) ont participé bénévolement à cette étude.

### 11.2.2 Analyses des données.

Chacune des mesures dépendantes (amplitude du roulis visuel, physique, global et gain) a été analysée par une ANOVA à mesures répétées 3 x 2 x 2 (angle d'inclinaison théorique x rayon de courbure x champ de vision). Les données d'un participant qui n'a pu compléter la session entière en raison des symptômes associés au mal du simulateur ont été exclues des analyses.

## 11.3 Résultats

Les analyses qualitatives ont révélé que, bien que les vingt-huit participants aient tous incliné la moto en direction du virage, seulement dix-huit d'entre eux ont incliné de manière constante l'horizon visuel dans la direction opposée au virage. Deux conducteurs n'ont jamais incliné l'horizon visuel, les huit conducteurs restants ayant incliné l'horizon visuel dans la même direction que la moto.

Sur ces huit motocyclistes, un motocycliste a incliné l'horizon visuel dans la même direction que la moto dans la condition du champ de vision limité, et a ensuite incliné l'horizon dans la direction opposée à celle de la moto dans la condition du champ de vision large. Un conducteur a systématiquement (à travers les deux conditions champ de vision) incliné l'horizon dans la même direction que le virage pour les rayons de courbure de 300 m et les angles d'inclinaison théorique de 20 et 30 degrés, mais n'a jamais incliné l'horizon pour les virages de 150 m de rayon de courbure pour des angles d'inclinaison théorique à la fois de 10 et 20 degrés. Enfin, un conducteur a incliné de manière constante l'horizon visuel dans la même direction que le virage dans toutes les conditions exceptées dans la condition 10 degrés d'inclinaison théorique x 150 m de rayon de courbure (au cours de laquelle il n'a jamais incliné l'horizon) et un participant a incliné l'horizon en suivant un mode aléatoire. Les données de ces 10 participants ont été exclues des analyses principales et, sont analysées et présentées séparément.

Les ANOVA ont été initialement réalisées avec la direction du virage prise en compte dans le modèle. Cependant, comme ce facteur n'a produit aucun effet significatif (principal ou d'interaction), ce dernier a été exclu du modèle. La figure 11.2 présente les amplitudes de roulis visuel et physique pour les 12 conditions expérimentales.

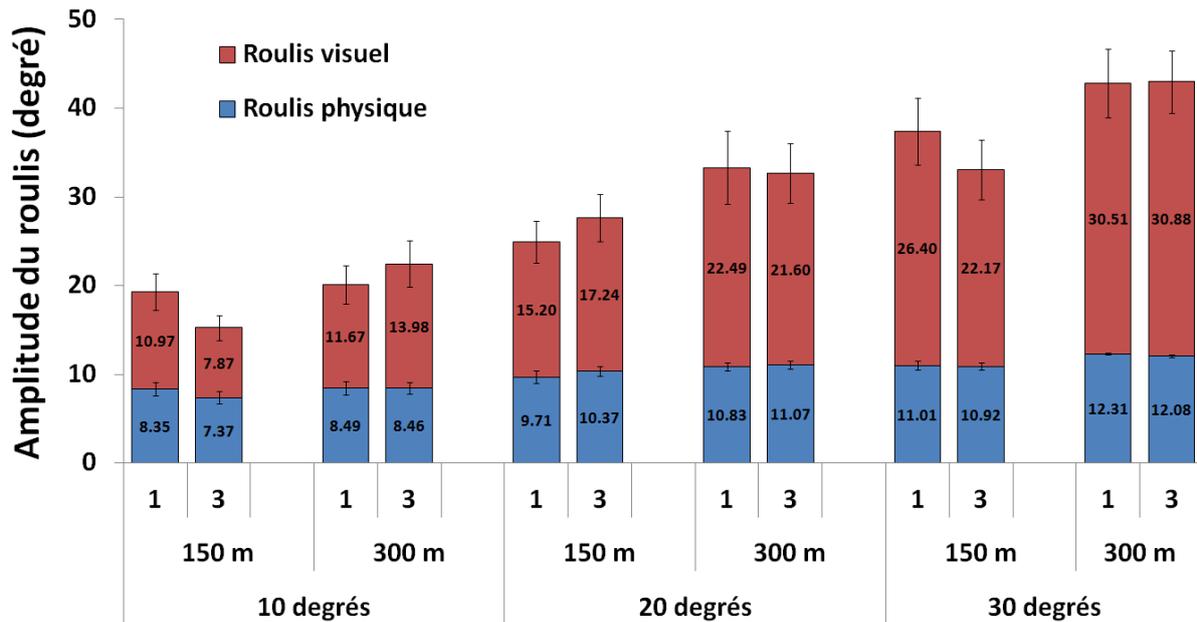


FIGURE 11.2 – Amplitude du roulis global (décomposé en roulis physique et visuel, en degré) en fonction de l’inclinaison théorique (10, 20 et 30 degrés), du rayon de courbure (150 et 300 m) et de la taille du champ de vision (1 et 3 écrans). Les barres d’erreur représentent l’erreur standard.

### 11.3.1 Roulis physique

L’ANOVA à mesures répétées 3 Angles d’inclinaison théorique x 2 Rayons de courbure x 2 Champs de vision sur l’angle de roulis physique a révélé un effet principal de l’inclinaison théorique,  $F(2, 34) = 43.55, p < .001, \eta^2 = .72$ , et du rayon de courbure,  $F(1, 17) = 15.73, p < .001, \eta^2 = .48$ . Le test post-hoc sur l’effet principal de l’angle d’inclinaison théorique a indiqué que l’amplitude du roulis physique augmentait significativement avec l’inclinaison théorique ( $M = 8,2, 10,5$  et  $11,6^\circ$ ,  $ET = 3, 2,2$  et  $1,6^\circ$ , pour respectivement, 10, 20 et 30 degrés d’inclinaison théorique). Le test post-hoc sur l’effet du rayon de courbure a indiqué que l’amplitude du roulis physique était significativement plus importante pour le rayon de courbure de 300 m ( $M = 10,5^\circ$ ,  $ET = 2,6^\circ$ ) que pour le rayon de courbure de 150 m ( $M = 9,6^\circ$ ,  $ET = 2,9^\circ$ ). L’effet principal du champ de vision n’était pas significatif ( $p > .10$ ), alors que l’interaction entre le champ de vision et l’angle d’inclinaison théorique ( $p = 0.08$ ) montrait une amplitude de roulis physique plus importante dans la condition du champ de vision large (3 écrans) que dans la condition de champ de vision limité (1 écran), seulement pour la condition de 20 degrés d’angle d’inclinaison théorique. Les moyennes pour l’amplitude du roulis physique sont présentées dans la figure 11.2.

### 11.3.2 Roulis visuel

L’ANOVA à mesures répétées sur l’angle de roulis visuel a révélé un effet principal de l’angle d’inclinaison théorique,  $F(2, 34) = 54.56, p < .001, \eta^2 = .76$ , et du rayon de courbure,  $F(1, 17) = 13.96, p < .01, \eta^2 = .45$ . Le test post-hoc sur l’effet principal de l’angle d’inclinaison théorique a indiqué que l’amplitude du roulis visuel augmentait significativement avec l’inclinaison théorique ( $M = 11,1, 19,1$  et  $27,5^\circ$ ,  $ET = 9, 13,6$  et  $15,5^\circ$ , pour respectivement, 10, 20 et 30 degrés d’inclinaison théorique). Le test post-hoc sur l’effet principal du rayon de courbure a indiqué que l’amplitude du roulis visuel était plus importante pour le rayon de courbure de 300 m ( $M = 21,9^\circ$ ,  $ET = 15,7^\circ$ ) que pour le rayon de courbure de 150 m

( $M = 16,6^\circ$ ,  $ET = 12,9^\circ$ ). Bien que l'effet principal du champ de vision n'était pas significatif ( $p > .10$ ), l'interaction à trois voies (champ de vision x angle d'inclinaison théorique x rayon de courbure) a approché le seuil de significativité ( $p = 0.06$ ). Les patterns de cette interaction sont identiques à ceux mis en évidence par cette même interaction sur le roulis global (voir section suivante). Les moyennes pour l'amplitude du roulis visuel sont présentées dans la figure 11.2.

### 11.3.3 Roulis global (somme du roulis visuel et physique)

L'ANOVA à mesures répétées sur l'angle de roulis global a révélé un effet principal de l'angle d'inclinaison théorique,  $F(2, 34) = 77.79, p < .001, \eta^2 = .82$ , et du rayon de courbure,  $F(1, 17) = 17.28, p < .001, \eta^2 = .50$ . Le test post-hoc sur l'effet principal de l'angle d'inclinaison théorique a indiqué que l'amplitude du roulis global augmentait de façon significative avec l'angle d'inclinaison théorique ( $M = 19,3, 29,6$  et  $39,1^\circ$ ,  $ET = 11, 14,5$  et  $16,2^\circ$ , pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés). Le test post-hoc sur l'effet principal du rayon de courbure a indiqué que l'amplitude du roulis global était significativement plus importante pour un rayon de courbure de 300 m ( $M = 32,4^\circ$ ,  $ET = 17,1^\circ$ ) que pour le rayon de courbure de 150 m ( $M = 26,3^\circ$ ,  $ET = 14,5^\circ$ ). Bien que l'effet principal du champ de vision n'était pas significatif ( $p > .10$ ), l'interaction à trois voies (champ de vision x angle d'inclinaison théorique x rayons de courbure) s'est révélée significative,  $F(2, 34) = 3.29, p < .05, \eta^2 = .16$ . Le test post-hoc sur cette interaction (figure 11.2) a indiqué que l'amplitude du roulis global était plus importante pour un rayon de courbure de 300 m que pour un rayon de courbure de 150 m quelle que soit la taille du champ de vision, mais uniquement pour 20 et 30 degrés d'angle d'inclinaison théorique. Dans la condition de 10 degrés d'angle d'inclinaison théorique, cette différence (entre les rayons de courbure) n'apparaît que pour le champ de vision le plus large ( $p < .01$ ). Le test post-hoc a indiqué également que dans la condition de 10 degrés d'angle d'inclinaison théorique (figure 11.2), le roulis global était plus important pour le champ de vision limité ( $M = 19,3^\circ$ ,  $ET = 11^\circ$ ) que pour le champ de vision large ( $M = 15,2^\circ$ ,  $ET = 8^\circ$ ), seulement pour le rayon de courbure de 150 m ( $p = 0.05$ ). Une tendance similaire a également été trouvée dans la condition 30 degrés d'angle d'inclinaison théorique ( $p = 0.09$ ). Les moyennes pour l'amplitude du roulis global sont présentées dans la figure 11.2.

### 11.3.4 Gain (ratio roulis visuel/physique)

L'ANOVA à mesures répétées sur le gain a révélé un effet principal de l'angle d'inclinaison théorique,  $F(2, 34) = 30.04, p < .001, \eta^2 = .64$ , et du rayon de courbure,  $F(1, 17) = 7.07, p < .05, \eta^2 = .29$ , mais aucun effet principal et d'interaction du champ de vision ( $p > .10$ ). Le test post-hoc sur l'effet principal de l'angle d'inclinaison théorique a indiqué que le gain augmentait de façon significative avec l'angle d'inclinaison théorique ( $M = 1,4, 1,8$  et  $2,4$ ,  $ET = 0,9, 1,1$  et  $1,2$ , pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés). Le test post-hoc sur l'effet principal du rayon de courbure a indiqué que le gain était significativement plus élevé pour un rayon de courbure de 300 m ( $M = 2$ ,  $ET = 1,2$ ) que pour un rayon de courbure de 150 m ( $M = 1,7$ ,  $ET = 1,1$ ).

### 11.3.5 Vitesse et rayon de courbure

Les résultats portant sur le rayon de courbure ont montré que l'amplitude de roulis choisie par les participants augmentait avec le rayon de courbure. Alors que dans la relation entre la vitesse de passage d'une moto dans un virage, le rayon de courbure et l'angle d'inclinaison de la moto prédit que, pour une vitesse donnée, plus le rayon de courbure augmente moins la moto s'incline, les résultats obtenus

(figure 11.3) sont contre-intuitifs. Compte tenu du plan expérimental de cette étude, pour une inclinaison donnée, la vitesse de passage co-variait avec le rayon de courbure (voir tableau 9.2, p. 137). Il ne peut donc pas être exclu que l'effet du rayon de courbure obtenu s'explique par la variation conjointe de la vitesse de la moto.

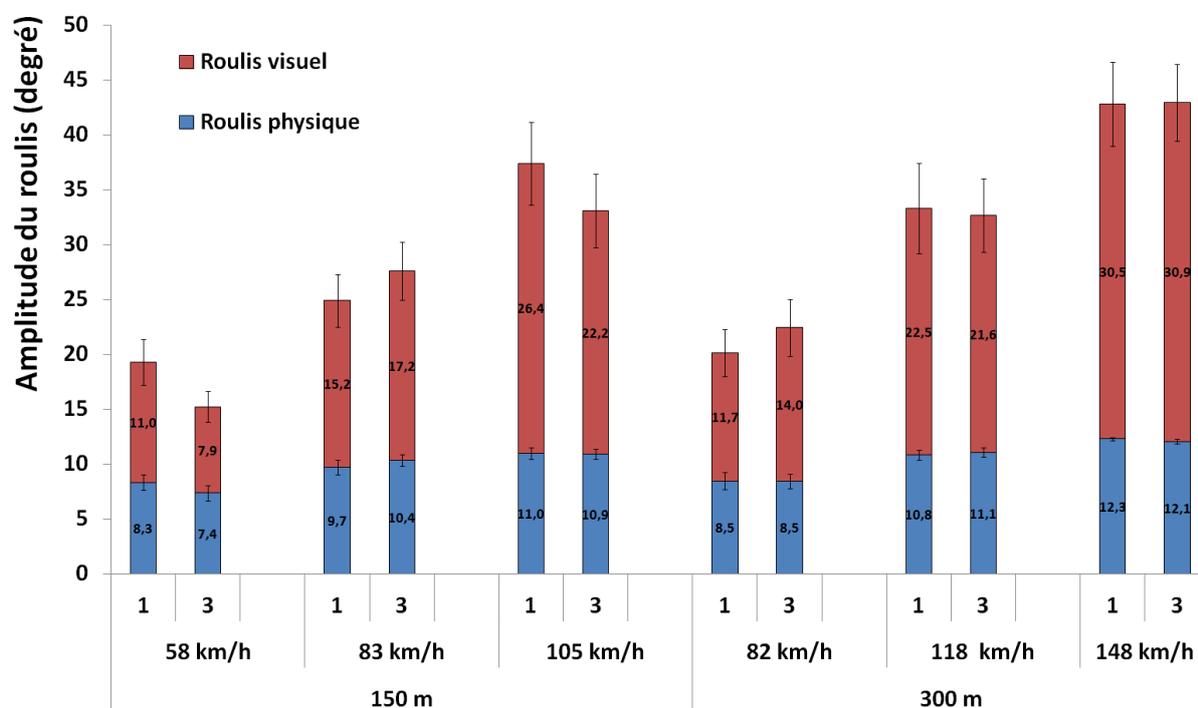


FIGURE 11.3 – Amplitude du roulis global (décomposé en roulis physique et visuel) en fonction du rayon de courbure et de la vitesse de déplacement. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

Afin de mieux comprendre les contributions respectives de la vitesse et du rayon de courbure aux amplitudes de roulis obtenues, des analyses de régression multiple ont été menées séparément pour les conditions 1 et 3 écrans, avec la vitesse et le rayon de courbure comme variables indépendantes, et l'amplitude du roulis des différentes mesures (visuel, physique, et roulis global) comme variable dépendante (avec des analyses séparées pour chaque variable dépendante).

Des modèles significatifs ont émergé pour toutes les variables dépendantes, à la fois pour un écran ( $F_s(2, 429) > 52.8; p_s < .001$ ) et trois écrans ( $F_s(2, 429) > 72.7; p_s < .001$ ). Pour la condition 1 écran, les modèles ont expliqué 20, 21 et 23 % ( $R^2$  ajusté = .20 ; .21 et .23, respectivement) de la variance des roulis visuel, physique et global. Pour la condition 3 écrans, ils en ont expliqué 25, 28 et 30 % ( $R^2$  ajusté = .25, .28 et .30, respectivement).

Pour le champ de vision restreint, les résultats ont révélé des relations linéaires entre à la fois les facteurs de vitesse et rayon de courbure et l'amplitude du roulis visuel ( $\beta_s = .53$  et  $-.16, p_s < .01$ , pour la vitesse et le rayon de courbure, respectivement), entre seulement la vitesse et l'amplitude de roulis physique ( $\beta = .51, p < .001$ , pour la vitesse et  $\beta = -.08, p > .10$  pour le rayon de courbure), et entre à la fois la vitesse et le rayon de courbure et l'amplitude du roulis global ( $\beta_s = .56$  et  $-.16, p_s < .01$ , pour la vitesse et le rayon de courbure, respectivement).

Pour le champ de vision large, les résultats ont révélé des relations linéaires entre à la fois les facteurs de vitesse et rayon de courbure et l'amplitude du roulis visuel ( $\beta_s = .61$  et  $-.20, p_s < .001$ , pour la vitesse et le rayon de courbure, respectivement), entre la vitesse et le rayon de courbure et l'amplitude de roulis

physique ( $\beta_s = .61$  et  $-.14$ ,  $ps < .01$ , respectivement), et entre à la fois la vitesse et le rayon de courbure et l'amplitude du roulis global ( $\beta_s = .66$  et  $-.21$ ,  $ps < .001$ , respectivement).

Ces résultats mettent donc en évidence l'effet de la vitesse de passage mais soulignent également le rôle significatif du rayon de courbure sur les amplitudes de roulis.

### 11.3.6 Autres patterns de réponse

Cinq participants ont incliné l'horizon visuel dans la même direction que la moto (*i.e.*, direction du virage). Le roulis global moyen (calculé comme la somme des roulis visuel et physique) était de 11,3, 16,6, et 22,1° pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés d'inclinaison théorique. Les données ont également suggéré que l'augmentation du roulis global résultait, de manière similaire à la population principale analysée précédemment, à la fois de l'augmentation du roulis visuel et du roulis physique (roulis visuel de 4, 6,5, 10,2° et roulis physique de 7,3, 10,1 et 11,9° pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés d'inclinaison théorique). Les données ont également suggéré que le roulis global moyen augmentait avec le rayon de courbure (roulis visuel de 6,3 et 7,5° et roulis physique de 9,4 et 10,2° pour, respectivement, 150 et 300 m). Enfin, les données ont également suggéré que l'amplitude du roulis global augmentait avec la taille du champ de vision ( $M = 10,1, 14,9$ , et  $21^\circ$  dans la condition 1 écran, et  $12,4, 18,3$  et  $23,3^\circ$  dans la condition 3 écrans, pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés d'angles d'inclinaison théorique ;  $M = 14,3$  et  $16,4^\circ$  dans la condition 1 écran et,  $17,0$ , et  $19,0^\circ$  dans la condition 3 écrans, pour respectivement, des rayons de courbure de 150 et 300 m).

Deux participants n'ont pas du tout incliné l'horizon visuel. De manière similaire à la population principale analysée, les données ont suggéré que le roulis physique augmentait avec l'angle d'inclinaison théorique ( $M = 7,5, 9,6, 9,7^\circ$  et  $ET = 2,1, 2,8, 3,1^\circ$  pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés). En revanche, le rayon de courbure semble avoir eu peu d'effet sur l'angle de roulis produit ( $M = 8,7$  et  $9,2^\circ$ ,  $ET = 3$  et  $2,7^\circ$  pour, respectivement, 150 et 300 m). Les résultats suggèrent également que la taille du champ de vision n'influence pas l'amplitude du roulis physique ajusté par les participants ( $M = 8,8$  et  $9^\circ$ ,  $ET = 3$  et  $2,8^\circ$  pour, respectivement, la condition 1 et 3 écrans).

Enfin, trois participants n'étaient pas constants, inclinant l'horizon visuel dans la direction du virage pour certains essais et ne l'inclinant pas pour d'autres essais (deux participants) ou inclinant l'horizon dans la direction du virage pour certains essais et dans la direction opposée pour d'autres (un participant).

### 11.3.7 Scores au SSQ

Afin d'investiguer l'*effet simulateur* sur le score total obtenu au SSQ, nous avons réalisé un *t* de Student sur le score total obtenu en pré et post-session. Le test *t* de Student a révélé un *effet simulateur* sur le score au SSQ,  $t(27) = -3,28$ ,  $p = .002$ , les symptômes déclarés par les motocyclistes étant plus importants après la session expérimentale comparé à leur arrivée à la session (figure 11.4a). Néanmoins, d'un point de vue descriptif, nous pouvons constater que les scores aux différentes sous-échelles (calculés en soustrayant les mesures pré-expérimentales des mesures post-expérimentales) sont assez faibles (figure 11.4b), compte tenu des scores maximaux de chaque sous-échelle.

Afin d'étudier l'effet du champ de vision (dit "*effet écran*") sur le score au SSQ, un test *t* de Student a été réalisé en comparant les scores au SSQ 3 écrans et 1 écran. Le test n'a pas révélé d'*effet écran* sur le score au SSQ ( $p > .10$ ). L'effet de l'ordre de passation (passage de 1 à 3 et de 3 à 1 écran) a également été vérifié, les résultats n'ont pas révélé d'effet de ce facteur sur le score au SSQ ( $p > .10$ ).

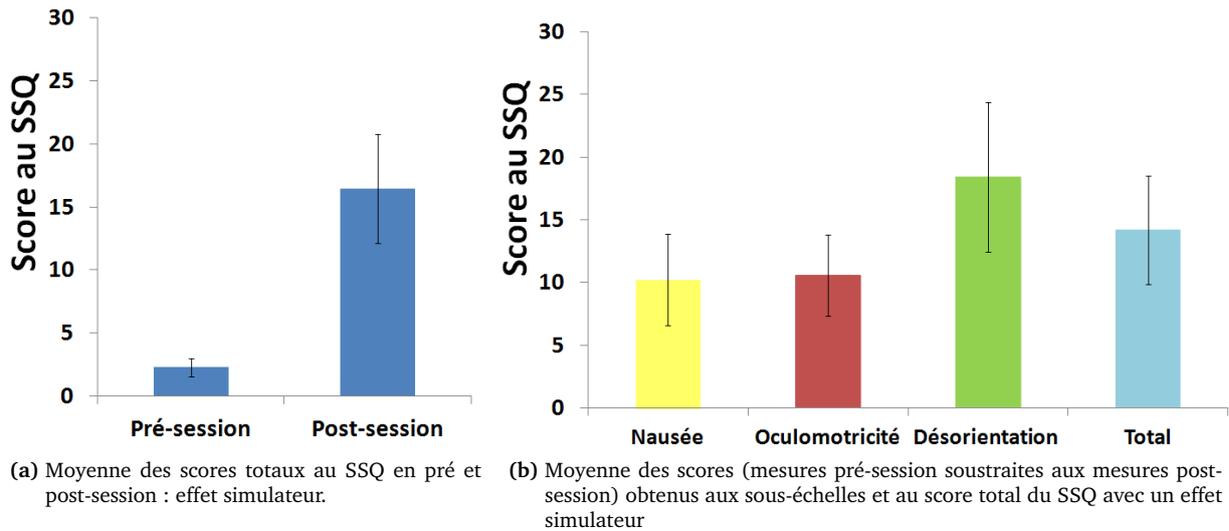


FIGURE 11.4 – Le mal du simulateur. Les scores maximaux sont de 200,34 pour la sous-échelle *nausée*, de 159,18 pour *l'oculomotricité*, de 292,32 pour la *désorientation* et de 235,62 pour le *score total* au questionnaire. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

## 11.4 Discussion

Le but de cette étude était de déterminer le roulis global, physique et visuel ajusté par les participants en fonction de la taille du champ visuel horizontal, de la courbure de la route et de l'inclinaison théorique d'une moto réelle, cette inclinaison étant directement dépendante de la vitesse de passage et du rayon de courbure. Bien que le mal du simulateur ait été mis en évidence lors de cette étude, les symptômes déclarés par les participants étaient d'intensité légère en comparaison des scores maximaux possibles aux différentes sous-échelles du questionnaire du mal du simulateur et, l'apparition de ces symptômes pourraient provenir de la durée de l'expérience [Stanney et al., 2002].

Les résultats principaux ont révélé que la sensation d'inclinaison était la plus crédible lorsque le simulateur ainsi que la scène visuelle étaient inclinés, et que l'amplitude de l'inclinaison dépendait de l'inclinaison théorique, du rayon de courbure et de la vitesse de passage. En revanche, les résultats sont plus mitigés concernant l'influence de la taille du champ de vision. Les résultats n'ont pas révélé d'effets principaux de ce facteur sur l'amplitude de l'inclinaison nécessaire pour une illusion crédible mais ont toutefois révélé des effets d'interaction de ce facteur sur l'amplitude de l'inclinaison.

Ces résultats sont discutés par la suite selon une double perspective, d'application et de confrontation aux quelques résultats déjà disponibles en matière de simulation de conduite deux-roues.

### 11.4.1 Le roulis global, ou quelle proportion d'inclinaison faut-il restituer ?

Pour ce qui concerne l'effet de l'inclinaison théorique, les participants ont augmenté l'amplitude du roulis global avec l'angle d'inclinaison théorique. En effet, le roulis global moyen obtenu était de 19,3, 29,6 et 39,1 degrés pour, respectivement, 10, 20 et 30 degrés d'inclinaison théorique. Les participants ont ainsi produit des angles d'inclinaison supérieurs aux angles d'inclinaison qui seraient pris en réalité pour des conditions similaires (93 %, 48 % et 30 % d'inclinaison de plus qu'en situation réelle, pour respectivement, 10, 20 et 30 degrés d'inclinaison théorique), néanmoins cette augmentation de l'inclinaison apparaît diminuer avec l'augmentation de l'inclinaison théorique.

Alors que « l'erreur » moyenne est de 57 % par rapport à l'angle d'inclinaison théorique, celle-ci,

bien que supérieure à l'erreur moyenne (12,2 %) de l'expérience 3, reste largement inférieure au 170 % d'erreur rapporté dans l'étude menée par Kageyama et Tagami [2002]. De plus, ces valeurs sont plus proches d'autres études sur la réception de balles [Baurès et al., 2009] ou perception de la distance [Plumert et al., 2005] qui compare les environnements virtuel et réel.

Les différences de résultats entre les diverses études peuvent refléter des différences au niveau des tailles des écrans et des angles visuels. Kageyama et Tagami [2002] ont projeté leur scène visuelle sur un seul écran installé en face du simulateur avec un angle latéral de visibilité de 150 degrés et un angle vertical de 35 degrés, alors que Cossalter et al. [2010] ont projeté la scène sur trois écrans mesurant 1,5 x 2 m fournissant au conducteur une vue plus large (de 240 degrés). Stedmon et al. [2009] ont utilisé un seul écran ( $\sim 2,5 \text{ m}^2$ ). Ces différences entre les précédentes études et entre ces études et les nôtres peuvent également être attribuées à des différences méthodologiques. Dans l'étude menée par Kageyama et Tagami [2002], les participants jugeaient le réalisme de divers algorithmes de mouvement pour lesquels le roulis était manipulé (paramètres de restitution du roulis prédéterminés), alors que dans l'étude de Cossalter et al. [2010] les paramètres de restitution du roulis étaient obtenus par une procédure itérative. Nos participants devaient, quant à eux, ajuster eux-mêmes le roulis visuel et physique, dans des conditions de conduite prédéterminées, en affinant au mieux, virage après virage, leur sensation d'inclinaison. Toutefois, les différences trouvées entre notre expérience 3 et celle-ci peuvent être dues à des différences au niveau de l'illumination de la pièce (seulement en expérience 3, la pièce était éclairée), ou peuvent être le reflet non pas du champ de vision horizontal mais dues aux différences existantes au niveau du champ de vision vertical qui était de 54 degrés en expérience 3 et de 80 degrés dans cette étude.

En considérant que selon les conditions utilisées par l'ensemble des études, différents modèles de restitution du roulis sont produits, nous pouvons supposer que le modèle de restitution du roulis qui génère une illusion d'inclinaison réaliste en virage peut être sensible aux caractéristiques du dispositif expérimental mais aussi de la méthodologie psychophysique à partir de laquelle il est déterminé.

#### **11.4.2 Comment répartir le roulis physique et le visuel ?**

Les participants ont augmenté l'amplitude des roulis visuel et physique en fonction de l'angle d'inclinaison théorique, indiquant que les motocyclistes avaient conscience des changements se produisant au niveau des conditions de conduite et qu'ils répondaient de manière sensible à ces changements. Alors que le roulis visuel et le roulis physique ont augmenté ensemble avec l'angle d'inclinaison théorique, le roulis visuel a augmenté avec une amplitude plus importante, résultant en des augmentations significatives du gain (de 1,4 pour 10 degrés, à 1,8 pour 20 degrés, et jusqu'à 2,4 pour 30 degrés). Toutefois, contrairement à l'expérience 3 où les participants ont partagé le roulis global de façon relativement équitable entre le roulis visuel et physique, dans cette étude, les résultats ont montré un partage inégal du roulis global entre les deux dimensions (visuelle et physique) avec une contribution majeure du roulis visuel (gain supérieur à l'unité). Cette contribution plus importante du roulis visuel semble être à l'origine de la « surestimation » du roulis global (reproduction de roulis supérieur aux angles d'inclinaison théoriques).

#### **11.4.3 Quel rôle le roulis visuel joue-t-il dans l'illusion d'inclinaison ?**

La prédiction que les motocyclistes compenseraient pour les mouvements limités de la plate-forme mobile à travers l'inclinaison de l'horizon tend à être confirmée par les valeurs de gains moyens observés pour les différentes conditions d'inclinaison. De plus, ce constat apparaît être constant à travers les deux dispositifs visuels (60 degrés et 180 degrés). Pour l'ensemble des conditions d'inclinaison théorique, les

participants semble en effet sur-utiliser le roulis visuel par rapport au roulis physique (limité à 12,5 degrés). L'utilisation d'inclinaison de l'horizon même dans la condition 10 degrés d'inclinaison théorique suggère également qu'un montant minimum de mouvement visuel est nécessaire au conducteur pour obtenir l'illusion d'inclinaison en virage attendue.

A ces observations, il faut ajouter les données obtenues pour le roulis physique. Les résultats ont en effet montré que pour les trois conditions d'inclinaison, les participants n'ont pas employé la totalité du roulis physique à leur disposition. Dans la condition 10 degrés d'inclinaison théorique, les motocyclistes ont incliné le simulateur seulement de 8 degrés en moyenne et ils ont excédé 12 degrés en moyenne seulement dans la condition 30 degrés d'inclinaison théorique pour les virages de 300 m de rayons de courbure, mais sont restés en moyenne toutefois sous la limite des 12,5 degrés. Ce constat a été discuté de manière détaillée en expérience 3. Brièvement, une possible raison à cette utilisation seulement partielle du mouvement physique est que les motocyclistes aient voulu éviter une sensation de chute à partir du simulateur, une telle sensation est probable en raison de l'absence de force centrifuge. Les motocyclistes sont alors exposés uniquement à la force de gravité sur simulateur. Dans l'expérience 4, nous avons souligné que la probabilité de se sentir chuter apparaissait et augmentait à partir d'un angle de 11,5 degrés.

Par conséquent, l'augmentation plus faible du mouvement physique par rapport au mouvement visuel n'est pas seulement conditionnée par les limites de la plate-forme mobile mais aussi par le fait que les individus peuvent ressentir une sensation de chute pour des angles d'inclinaison importants. Toutefois, de manière anecdotique, aucun des participants ne s'est plaint, pendant l'expérience ou lors du débriefing oral, d'avoir ressenti une quelconque sensation de chute.

Finalement, les données des autres patterns de réponse ont indiqués plus ou moins les mêmes patterns qui ont été décrits par les principales analyses au regard du roulis physique. Ainsi, ces participants ont augmenté l'angle d'inclinaison en fonction du roulis théorique et en dépit de ne pas avoir utilisé l'horizon visuel pour compenser les limites du roulis physique, de façon similaire à la majorité des motocyclistes ces participants n'ont pas utilisé complètement la plage de mouvement possible de la plate-forme mobile, probablement en raison d'une sensation de chute ressentie aux angles importants.

#### **11.4.4 Dans quelle direction le roulis visuel doit-il être incliné par rapport à la direction du virage ?**

Cette étude a révélé, tout comme l'expérience 3, trois patterns différents d'inclinaison de la scène visuelle. Ce constat a été discuté de manière détaillé en expérience 3 où nous suggérons que ces différents patterns pouvaient refléter des différences aux niveaux des comportements naturels d'orientation et de position de la tête lors de la prise de virage (voir expérience 3, p. 146, pour une discussion détaillée). En accord avec Stedmon et ses collègues [2009], notre étude indique que la majorité des motocyclistes a préféré l'inclinaison de l'horizon visuel en direction opposée au virage et, que cette préférence d'utilisation ne variait pas en fonction de la taille du champ visuel.

#### **11.4.5 Effet du rayon de courbure sur l'amplitude de roulis**

Pour les dimensions visuelle et physique (et donc le roulis global) l'effet principal du rayon de courbure a indiqué une amplitude du roulis plus importante pour les virages de 300 m de rayon de courbure en comparaison à ceux de 150 m de rayon de courbure. Les patterns pour ces différences contre-intuitives entre les rayons de courbures trouvées dans cette étude sont identiques à celles identifiées lors de l'expé-

rience 3 et sont déjà discutées en détails dans l'étude 3. De manière brève, ces patterns indiquent que les participants ont été plus influencés par la vitesse que par le rayon de courbure ou par une combinaison des deux. Cette observation est supportée par les analyses de régression, qui ont révélé des relations plus puissantes entre la vitesse et les roulis (visuel, physique et global) qu'entre les rayons de courbure et les différents roulis. Ces relations étaient généralement plus fortes avec le champ de vision large en comparaison au champ de vision limité, reflétant probablement le rôle critique joué par les informations visuelles périphériques dans la perception de la vitesse [Shinar, 1978].

Cependant, dans la condition du champ de vision limité, les roulis visuel, physique et global pour la condition 150 m de rayon de courbure x 20 degrés d'inclinaison théorique ( $M = 15,2, 9,7, 24,9^\circ$ ;  $ET = 10,1, 2,9, 11,^\circ$ , respectivement) étaient plus importants que dans la condition 300 m de rayon de courbure pour un angle d'inclinaison théorique de 10 degrés ( $M = 11,6, 8,5, 20,1^\circ$ ,  $ET = 9,1, 3,3, 11,2^\circ$ , respectivement), en dépit d'avoir les mêmes vitesses d'évolution ( $83$  et  $82 \text{ km.h}^{-1}$ , respectivement pour les deux conditions). Ces patterns sont retrouvés dans la condition du champ de vision large : des roulis plus importants ont été trouvés dans la condition 150 m de rayon de courbure x 20 degrés d'inclinaison théorique (visuel :  $M = 17,2^\circ$ ,  $ET = 11,2^\circ$ ; physique :  $M = 10,4^\circ$ ,  $ET = 2,2^\circ$ ; global :  $M = 27,6^\circ$ ,  $ET = 11,8^\circ$ ) en comparaison à la condition 300 m de rayon de courbure x 10 degrés d'angle d'inclinaison théorique (visuel :  $M = 14^\circ$ ,  $ET = 11,1^\circ$ ; physique :  $M = 8,5^\circ$ ,  $ET = 2,8^\circ$ ; global :  $M = 22,4^\circ$ ,  $ET = 12,8^\circ$ ), fournissant encore une preuve directe que les participants ont été également sensibles aux différents rayons de courbure (en augmentant l'angle de roulis pour les virages serrés).

Finalement, alors qu'en expérience 3, avec l'ensemble des mesures, le pattern de l'interaction entre l'angle d'inclinaison théorique et le rayon de courbure suggérait que l'effet principal du rayon de courbure (*i.e.*, augmentation du roulis en fonction du rayon de courbure du virage) était décrit seulement pour la condition 30 degrés d'inclinaison théorique, dans cette expérience, l'interaction entre l'angle d'inclinaison théorique et le rayon de courbure n'était pas significative. En revanche, l'interaction à trois voies significative dans cette étude suggère le constat suivant : alors que pour les angles d'inclinaison théoriques modérés de 20 degrés et les plus extrêmes de 30 degrés, les participants veulent que la simulation moto atteigne une amplitude de roulis plus importante dans les virages de 300 m de rayon de courbure que dans les virages serrés de 150 m de rayon de courbure, quelle que soit la taille du champ de vision (*i.e.*, dans les conditions de champ de vision limité et large), pour les angles d'inclinaison théorique faibles de 10 degrés ceci s'avère également être le cas seulement lorsque le champ de vision est large.

#### 11.4.6 Effet de la taille du champ visuel sur l'amplitude du roulis

Les résultats ont montré que l'amplitude du roulis augmentait avec la largeur du champ visuel seulement pour une condition particulière (10 degrés d'inclinaison x 150 m de rayon de courbure), avec le dessin d'une tendance similaire dans la condition de 30 degrés d'inclinaison théorique. Nous avons ainsi, dans l'ensemble, trouvé qu'un rôle modéré de la taille du champ de vision sur l'amplitude du roulis établi par les participants avec des valeurs de roulis assez proches entre les deux conditions d'angles visuels horizontaux de cette étude (60 et 180 degrés). Ces valeurs sont en revanche largement supérieures à celles identifiées lors de l'expérience 3 qui utilisait un angle visuel latéral de 72 degrés, alors que nous pouvions nous attendre à une diminution graduelle de l'amplitude de roulis produit par les participants avec l'augmentation de la largeur du champ visuel, en raison de l'apport plus important d'informations visuelles périphériques impliquées dans la perception de mouvement dans l'espace. L'origine exacte de cette absence de différence entre les deux conditions de champ visuel et l'origine des différences entre

cette étude et l'expérience 3 sont à investiguer.

## Chapitre 12

# Expérience 6 : Effet du couplage entre le roulis physique et le roulis visuel et de la taille du champ visuel sur la détection du mouvement et de l'inclinaison, et sur la perception de la chute.

### 12.1 Motivation et problématique de l'étude

Venant compléter l'expérience précédente, cette étude s'est intéressée à l'impact potentiel de la taille du champ visuel horizontal sur la sensibilité du conducteur au mouvement de roulis. Reprenant les bases des expériences précédentes, cette expérience a ainsi comparé l'effet d'un champ visuel horizontal réduit (1 écran sous-tendant un angle horizontal de 60 degrés) et d'un champ visuel horizontal large (3 écrans sous-tendant un angle horizontal de 180 degrés) sur la détection du mouvement et de l'inclinaison, et sur la perception de la chute.

Compte tenu de la littérature dans le domaine et de nos précédents résultats, nous pouvons supposer :

- 1) que le seuil de détection du mouvement n'est pas influencé par la taille du champ de vision puisque la détection du mouvement sur simulateur moto, phénomène dynamique, semble solliciter principalement les récepteurs vestibulaires (canaux semi-circulaires) et proprioceptifs.
- 2) que l'augmentation de la taille du champ visuel augmentera la sensibilité à la détection (angle au moment de la réponse plus faible) en raison de la contribution plus importante des informations périphériques en comparaison à un champ visuel horizontal réduit.
- 3) et enfin, pour la tâche de perception de la chute, que l'augmentation du champ visuel horizontal entraînera une augmentation de la sensibilité à la chute, mis en évidence par un angle au moment de la réponse plus faible, comparativement à un champ visuel horizontal réduit en raison d'une sensation de chute induite visuellement. La vitesse seuil peut également être impactée mais le sens de cette évolution dépend des patterns de réponse mis en évidence précédemment. Dans la condition où l'horizon visuel ne s'incline pas, nous supposons que le seuil de perception de la chute ne sera pas influencé par une modification de la taille du champ de vision latéral, en comparaison aux conditions visuelles où l'horizon est incliné.

## 12.2 Expérience 6A : Détection du mouvement et de l'inclinaison

### 12.2.1 Méthode

#### 12.2.1.1 Participants

Seize motocyclistes (15 hommes et 1 femme, âge moyen = 31,9 ans ; ET= 8,13 ans ; nombre moyen d'années de permis moto = 9,1 ans, ET = 7,1 ans ; nombre moyen de kilomètres parcourus par an = 18688 km/an, ET = 22072 km/an) ont participé à cette étude.

#### 12.2.1.2 Dispositif expérimental et tâche

L'expérience a été réalisée avec le même dispositif de restitution visuelle et inertielle que précédemment (voir section 11.2), le roulis physique maximum restant toujours limité à 12,5 degrés. Reprenant la scène visuelle de l'expérience 4, l'image projetée a été cependant modifiée. La scène visuelle (figure 12.1) représentait une route texturée infinie sans ligne de démarcation dans un environnement sans trafic. Des arbres ont été ajoutés et positionnés de manière aléatoire dans la scène visuelle, ces derniers permettant un apport supplémentaire d'informations visuelles relatives à la verticale gravitaire.

Lors de chaque inclinaison de la plate-forme mobile, l'image visuelle reproduisait une prise de virage correspondante grâce aux propriétés du flux optique. Toutefois, les participants ne contrôlaient ni leur trajectoire ni la vitesse de la moto virtuelle, qui étaient automatisées. Ces deux paramètres n'étaient donc pas influencés par une quelconque action réalisée au niveau du guidon, de l'accélérateur, des freins ou du sélecteur de vitesse. Les participants ne pouvaient ainsi anticiper la direction du virage et l'apparition du mouvement de roulis. La vitesse de déplacement était constante et fixée pour l'ensemble de l'expérience à 99,6 km.h<sup>-1</sup>. Celle-ci correspond à la vitesse linéaire associée aux gains moyens (ratio du roulis visuel/roulis physique) intégrés dans le modèle de restitution du roulis, qui ont été identifiés lors de l'expérience précédente (voir expérience 5 pour plus de détails sur la détermination des gains).



FIGURE 12.1 – Capture d'écran de la scène visuelle projetée lors de cette expérience.

Sur le modèle des expériences 1 et 4, au cours d'une même stimulation en roulis, les participants ont réalisé une tâche de détection du mouvement et de l'inclinaison. Les participants devaient ici également

fournir leurs réponses en utilisant les mêmes boutons que précédemment.

Chaque essai débutait avec le simulateur (plate-forme et horizon visuel) dans une position d'origine à 0 degré de roulis. Après deux secondes d'attente, le simulateur s'inclinait jusqu'à ce que la plate-forme mobile ait atteint un angle d'inclinaison de 6 degrés (dans la situation où le participant avait répondu avant l'atteinte de cet angle) ou jusqu'à son angle de roulis maximum (dans la situation où le participant avait répondu au-delà des 6 degrés d'inclinaison de la plate-forme mobile). Une fois l'angle de 6 degrés ou le roulis maximum atteint, le simulateur maintenait l'angle de roulis instantané pendant une seconde puis se replaçait automatiquement dans sa position d'origine à une vitesse de  $8 \text{ deg.s}^{-1}$ .

### 12.2.1.3 Plan expérimental

Dans cette étude, ont été manipulés :

- 1) la taille du champ visuel horizontal, qui était de 60 degrés lorsque la projection de l'image visuelle se faisait sur l'écran central, ou de 180 degrés lorsque la projection était étendue aux deux écrans latéraux de même caractéristique (voir figure 11.1 ; p. 174).
- 2) le couplage entre le roulis visuel et physique, qui pouvait prendre 3 formes : horizon visuel incliné dans la même direction que l'inclinaison de la plate-forme mobile et du virage (couplage « même direction »), horizon visuel incliné dans la direction opposée de la plate-forme mobile et du virage (couplage « direction opposée »), ou horizon maintenu stationnaire (couplage « horizon stationnaire ») ;
- 3) la vitesse d'inclinaison en roulis (0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8 et  $12 \text{ deg.s}^{-1}$ ) ;
- 4) et le côté d'inclinaison.

Les vitesses de roulis global, présentées ci-dessus, étaient identiques pour chaque condition de couplage. Pour le couplage « horizon stationnaire », la vitesse de roulis délivrée l'était uniquement par la plate-forme. Cependant, pour les deux conditions de couplage où l'horizon s'inclinait, ces vitesses de roulis global étaient partagées entre la dimension visuelle et physique selon la valeur du gain moyen (*i.e.*, ratio entre le mouvement de roulis visuel et physique) associée à ces deux conditions de couplage. Le gain moyen intégré dans le modèle de restitution de roulis était de 0,63 lorsque l'horizon s'inclinait dans la même direction que le simulateur, et de 1,86 lorsque l'horizon s'inclinait dans la direction opposée. Les valeurs de ces gains ont été déterminées par la moyenne des réponses obtenues lors de l'expérience 5. Les vitesses de roulis visuel et physique pour ces deux conditions sont présentées dans le tableau 12.1. Le plan expérimental 7 vitesses x 2 côtés d'inclinaison x 3 couplages roulis visuel/physique x 2 tailles du champ de vision latéral (1 et 3 écrans) résultait en 84 conditions expérimentales différentes.

### 12.2.1.4 Procédure

Une fois arrivés au laboratoire, les participants ont dans un premier temps pris connaissance des différentes informations relatives à l'expérience et à son déroulement avant de signer le formulaire de consentement. Ils ont ensuite complété un questionnaire informel portant sur leur pratique du deux-roues ainsi que le SSQ. Enfin, l'expérimentateur leur présentait le simulateur et ses différents constituants avant de leur expliquer le principe des différentes tâches à effectuer et de procéder à une session de familiarisation. Au cours de cette session, les participants ont réalisé six essais d'entraînement pour chacun des couplages entre le roulis visuel/physique, avec deux directions d'inclinaison et trois vitesses de roulis (2,5, 5 et  $10 \text{ deg.s}^{-1}$ ). Pour cette session d'entraînement, la condition champ de vision a été présentée de façon contrebalancée. Au cours de cette session comme de l'expérience proprement dite, la

**TABLE 12.1** – Distribution des vitesses de roulis ( $\text{deg.s}^{-1}$ ) global entre le roulis visuel et le roulis physique selon le couplage roulis visuel/physique testé.

Horizon stationnaire			Couplage « même direction » Gain : 0,63		Couplage « direction opposée » Gain : 1,86	
Roulis global	Roulis visuel	Roulis physique	Roulis visuel	Roulis physique	Roulis visuel	Roulis physique
0,25	–	0,25	0,10	0,15	0,16	0,09
0,5	–	0,5	0,19	0,31	0,33	0,17
1	–	1	0,39	0,61	0,65	0,35
2	–	2	0,77	1,23	1,30	0,70
4	–	4	1,55	2,45	2,60	1,40
8	–	8	3,09	4,91	5,20	2,80
12	–	12	4,64	7,36	7,80	4,20

Note : Les vitesses d'inclinaison visuelle et physique ont été obtenues à partir des relations suivantes : vitesse visuelle ( $\text{deg.s}^{-1}$ ) = (Vitesse Totale  $\times$  Gain) / (Gain + 1) et vitesse de roulis physique ( $\text{deg.s}^{-1}$ ) = (Vitesse Totale  $\times$  1) / (Gain + 1).

pièce était sans lumière et les participants portaient leur casque moto. Après s'être assuré que les détails relatifs à chaque tâche étaient clairs et compris des participants, l'expérimentation débutait.

Pour la tâche proprement dite, les participants devaient effectuer 2 essais par condition expérimentale. Cela résultait en un total de 168 essais pour cette tâche de détection de mouvement et de l'inclinaison (répartis en 12 blocs de 14 essais). L'ordre de passation de la condition champ de vision (1 et 3 écrans) était contrebalancé entre les participants. Pour chaque taille de champ de vision, les participants ont donc réalisé 2 blocs d'essais pour chaque condition de couplage roulis visuel/physique, soit au total 6 blocs d'essais qui étaient présentés de façon aléatoire. A l'intérieur des deux blocs d'une même condition de couplage roulis visuel/physique, la vitesse de roulis et le côté d'inclinaison était présenté également de façon aléatoire. Une pause était observée entre chaque bloc d'essais, et au moment du changement de champ de vision.

Au moment du changement de champ de vision et à la fin de l'expérience<sup>1</sup>, les participants ont de nouveau rempli le questionnaire du mal du simulateur. La session complète a duré 1h30 approximativement.

### 12.2.1.5 Analyse des données

Comme dans les expériences précédentes (expériences 1, 2 et 4), pour la tâche de détection du mouvement, la mesure a porté sur le temps de réponse. Pour la tâche de détection de l'inclinaison, les mesures ont porté sur le temps de réponse et sur l'angle d'inclinaison de roulis global au moment de cette réponse.

Ces différentes variables dépendantes ont été analysées à partir d'une ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison x Couplage roulis visuel/physique x Champ visuel. Le niveau de significativité a été fixé à 0,05 pour toutes les analyses statistiques. La taille de l'effet ( $\eta^2$ ) est également rapportée. Lorsque nécessaire, le test post-hoc de Newman-Keuls a été utilisé afin de déterminer les différences significatives.

1. En fin d'expérience les participants ont également réalisé un test de catégorisation (voir expérience 4, section 10.2.3) afin de déterminer le couplage préférentiel des participants. Sur les quinze participants, huit ont préféré le couplage "direction opposée", cinq ont préféré le couplage "horizon stationnaire", et deux participants ont utilisé préférentiellement le couplage "même direction". Les différentes analyses (bien que limitées en raison du nombre de participants) effectuées sur les données avec le facteur *groupe* (couplage préférentiel) n'ont pas révélé d'effet de ce facteur.

Les données d'un participant, qui étaient incohérentes, ont été exclues des analyses.

## 12.2.2 Résultats

Pour l'ensemble des tâches, l'ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison x Couplage roulis visuel/physique x Champ de vision n'a révélé aucun effet principal ou d'interaction du facteur Côté d'inclinaison sur les différentes variables dépendantes retenues. Par conséquent, les analyses détaillées ci-dessous ont été conduites sur l'ensemble des essais sans distinction du côté d'inclinaison.

### 12.2.2.1 Détection du mouvement

L'ANOVA à mesures répétées 7 Vitesses de roulis x 3 Couplages roulis visuel/physique x 2 Conditions de champ de vision sur le temps de réponse, a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $(6, 84) = 39.39, p < .001, \eta^2 = .73$ , et du couplage roulis visuel/physique,  $F(2, 28) = 28.78, p < .001, \eta^2 = .68$ , mais aucun effet principal ou d'interaction de la condition champ de vision.

Le test post-hoc sur l'effet principal de la vitesse de roulis a révélé une diminution significative du temps de réponse avec l'augmentation de la vitesse (figure 12.2). Plus précisément, les temps de réponse aux vitesses 0,25 et 0,5  $\text{deg.s}^{-1}$ , qui se différencient également de façon significative, étaient supérieurs aux autres vitesses. D'autre part, à partir de 1  $\text{deg.s}^{-1}$ , aucune différence significative n'est apparue entre les vitesses de roulis les plus élevées (2, 4, 8 et 12  $\text{deg.s}^{-1}$ ).

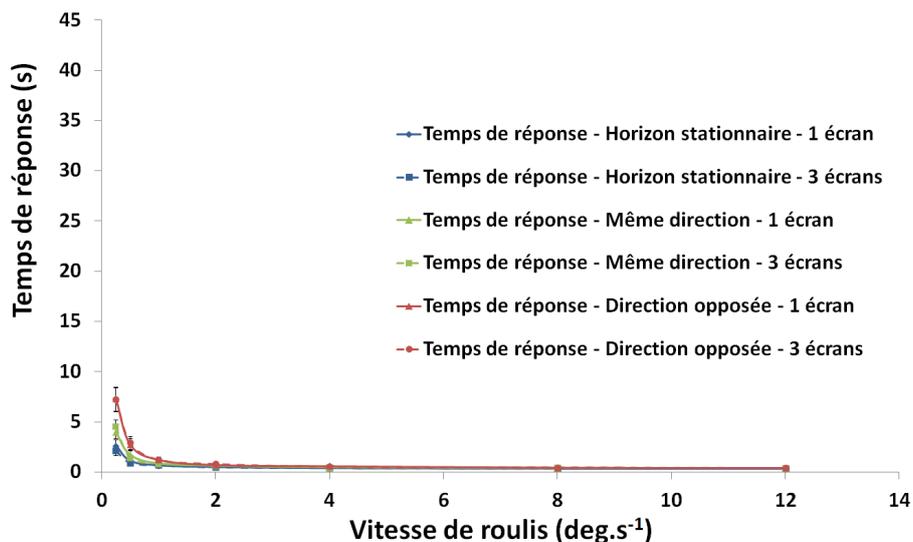


FIGURE 12.2 – Temps de détection du mouvement (s) en fonction du couplage roulis visuel/physique, du champ de vision et de la vitesse de roulis. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

Pour le couplage roulis visuel/roulis physique, les résultats ont montré que le temps mis pour détecter le mouvement était significativement plus important pour le couplage « même direction » ( $M = 1,22$  s,  $ET = 1,71$  s) que pour le couplage « horizon stationnaire » ( $M = 0,82$  s,  $ET = 1,11$  s) et encore plus important pour le couplage « direction opposée » ( $M = 1,95$  s,  $ET = 3,04$  s).

L'interaction entre le couplage roulis visuel/roulis physique et la vitesse de roulis était également significative,  $F(12, 168) = 17.99, p < .001, \eta^2 = .56$ . Les résultats (figure 12.2) ont montré que le temps de réponse était plus important pour la condition de couplage « direction opposée » en comparaison aux

conditions de couplage « horizon stationnaire » et « même direction », seulement pour les vitesses de roulis les plus faibles de 0,25 et 0,5 deg.s<sup>-1</sup>. De plus, les résultats ont montré que les participants détectaient plus tardivement le mouvement dans la condition « même direction » que dans la condition « horizon stationnaire », mais seulement pour la vitesse de roulis de 0,25 deg.s<sup>-1</sup>. A partir de ces vitesses, le temps de réponse entre les différentes conditions de couplage ne se différencie plus de façon significative.

### 12.2.2.2 Détection de l'inclinaison

L'ANOVA à mesures répétées 7 Vitesses de roulis x 3 Couplages roulis visuel/physique x 2 Conditions de champ de vision sur le temps de réponse a révélé un effet principal de la vitesse de roulis,  $F(6, 84) = 68.72, p < .001, \eta^2 = .83$ , et du couplage roulis visuel/physique,  $F(2, 28) = 51.15, p < .001, \eta^2 = .78$ , ainsi qu'une interaction entre ces deux facteurs,  $F(12, 168) = 31.06, p < .001, \eta^2 = .69$ .

Le test post-hoc sur l'effet principal de la vitesse de roulis a indiqué une diminution significative du temps de réponse avec l'augmentation de la vitesse de roulis. Le temps de réponse aux vitesses les plus faibles (0,25, 0,5 et 1 deg.s<sup>-1</sup>), qui se différencie significativement entre ces vitesses, était supérieur aux autres vitesses. L'analyse a également mis en évidence l'existence d'un plateau dans le temps de réponse à partir de 2 deg.s<sup>-1</sup>, le temps mis pour détecter l'inclinaison ne variant pas significativement entre 2 et 12 deg.s<sup>-1</sup> (figure 12.3). Pour le couplage roulis visuel/physique, les résultats ont montré que le temps mis pour détecter une inclinaison était significativement plus important pour le couplage « même direction » (M = 6,99 s, ET = 9,69 s) que pour le couplage « horizon stationnaire » (M = 4,77 s, ET = 6,50 s), et encore plus important pour le couplage « direction opposée » (M = 10,27 s, ET = 13,86 s).

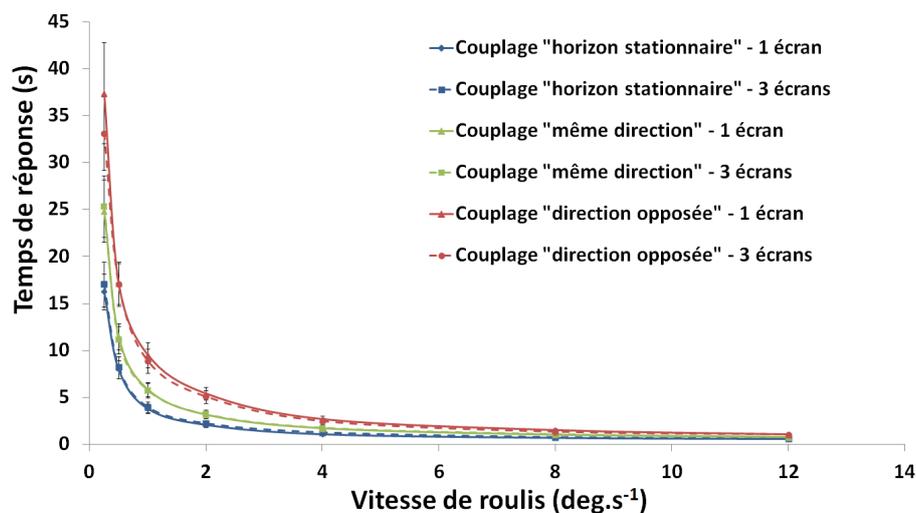


FIGURE 12.3 – Temps de réponse (s) en fonction du couplage roulis visuel/physique, du champ de vision et de la vitesse de roulis. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

Le post test réalisé sur l'interaction entre le couplage roulis visuel/physique et la vitesse de roulis a indiqué que le temps de réponse était significativement plus important pour la condition de couplage « direction opposée » qu'en conditions « même direction » et « horizon stationnaire », seulement pour les vitesses de roulis allant de 0,25 à 2 deg.s<sup>-1</sup>. De même, les résultats ont montré que le temps de réponse était significativement plus important dans la condition de couplage « même direction » que dans la condition « horizon stationnaire », mais seulement pour les vitesses de 0,25 et 0,5 deg.s<sup>-1</sup>. A partir de ces vitesses, le temps de réponse entre les différentes conditions de couplage ne se différencie plus de façon significative.

Bien que l'effet principal du champ de vision ne soit pas significatif, l'ANOVA a révélé que l'interaction entre le champ de vision, le couplage roulis visuel/physique et la vitesse de roulis approchait le seuil de significativité,  $F(12, 168) = 1.73, p = .06, \eta^2 = 0,11$ . L'interaction suggère que, pour le couplage « direction opposée », le temps mis pour détecter l'inclinaison était plus important lorsque le champ de vision était limité (1 écran) que lorsque le champ de vision était large (3 écrans), mais seulement pour la vitesse de roulis la plus faible de  $0,25 \text{ deg.s}^{-1}$ . Aucun autre effet d'interaction n'était significatif ( $p > .10$ ).

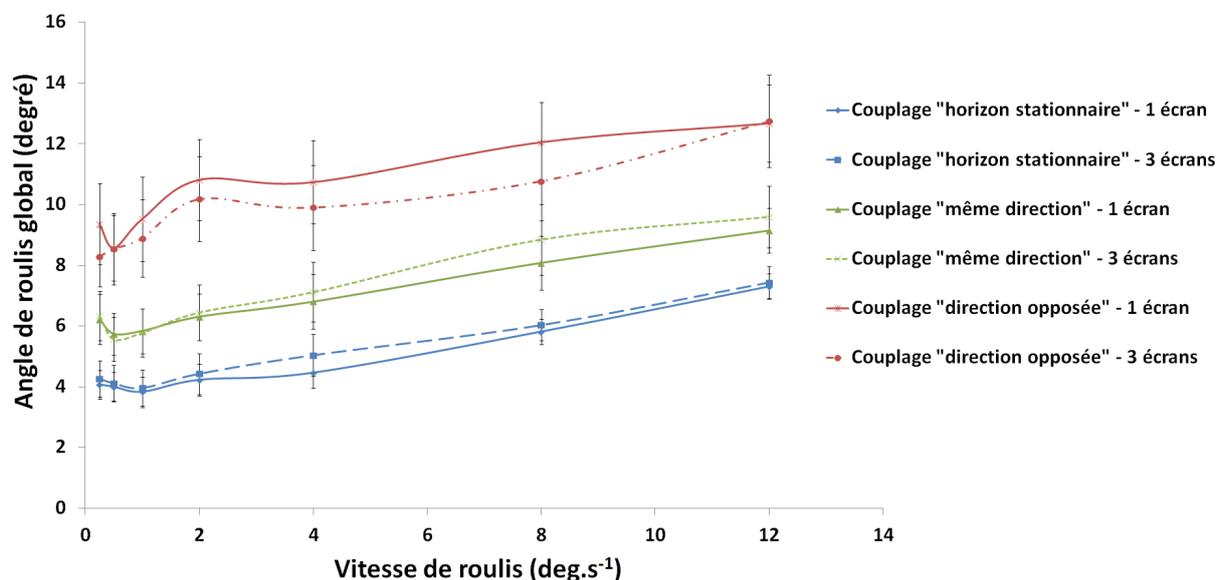


FIGURE 12.4 – Angle au temps de réponse (degré) en fonction du couplage roulis visuel/physique, du champ de vision et de la vitesse de roulis. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

L'ANOVA à mesures répétées sur l'angle au moment de la réponse a révélé un effet principal de la vitesse,  $F(6, 84) = 39.58, p < .001, \eta^2 = .74$ , et du couplage roulis visuel/physique,  $F(2, 28) = 50.40, p < .001, \eta^2 = .78$ , mais aucun effet principal du champ de vision ( $p > .10$ ). Pour la vitesse, les résultats ont montré une absence de différence significative entre les vitesses allant de  $0,25$  à  $1 \text{ deg.s}^{-1}$ , mais une augmentation, avec la vitesse de roulis, de l'angle d'inclinaison au moment de la réponse à partir de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$ . Pour le couplage roulis visuel/physique, les résultats ont indiqué que l'angle au moment de la réponse était significativement plus faible dans la condition de couplage « horizon stationnaire » ( $M = 4,93^\circ, ET = 2,35^\circ$ ) comparé aux conditions « même direction » ( $M = 6,98^\circ, ET = 3,49^\circ$ ) et « direction opposée » ( $M = 10,21^\circ, ET = 5,09^\circ$ ), l'angle au moment de la réponse étant significativement plus faible en condition « même direction » qu'en condition « horizon stationnaire » (figure 12.4).

L'interaction entre le couplage roulis visuel/physique et la vitesse de roulis était significative,  $F(12, 168) = 1.90, p < .05, \eta^2 = .12$ . Le test post-hoc sur cette interaction a montré que l'angle au moment de la réponse était significativement plus faible dans la condition de couplage « horizon stationnaire » en comparaison à la condition « même direction » et « direction opposée » pour l'ensemble des vitesses de roulis. De plus, les résultats ont indiqué une absence de différence significative entre les vitesses allant de  $0,25$  et  $4 \text{ deg.s}^{-1}$  et une augmentation de l'angle de roulis global à partir de  $8 \text{ deg/s}$  pour les conditions de couplage « horizon stationnaire » et « même direction ». En revanche, pour la condition « direction opposée », les résultats ont indiqué une absence de différence entre les vitesses de  $0,25$  et  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$  et une augmentation de l'angle de roulis dès  $1 \text{ deg.s}^{-1}$ .

Bien que l'effet principal du champ de vision ne soit pas significatif, l'interaction entre le champ

de vision et le couplage roulis visuel/physique était significative,  $F(2, 28) = 3.49, p < .05, \eta^2 = 0, 20$ . Seulement pour la condition « direction opposée », les participants ont détecté l'inclinaison plus tôt (angle plus faible) pour la condition de champ de vision large que pour la condition de champ de vision limité.

### 12.2.2.3 Scores au SSQ

Le mal du simulateur a été évalué avant et après chaque condition de champ de vision au moyen du SSQ. D'un point de vue descriptif, nous constatons que les scores (calculés en soustrayant les mesures pré-expérimentales des mesures post-expérimentales) obtenus aux différentes sous-échelles sont assez faibles (figure 12.5b), les scores maximaux aux différentes sous-échelles approchant approximativement 200 points.

Afin d'investiguer l'effet simulateur sur le score total obtenu au questionnaire, nous avons réalisé un test  $t$  de Student sur le score total obtenu en pré et post-session. Le test  $t$  de Student a révélé que l'effet simulateur sur le score au SSQ approchait le seuil de significativité,  $t(14) = -1, 86, p = .08$ , suggérant que les symptômes déclarés par les motocyclistes étaient plus importants après la session expérimentale qu'à leur arrivée à la session (figure 12.5a).

Afin d'étudier l'effet écran sur le score au SSQ, un test  $t$  de Student a été réalisé en comparant les scores au SSQ 3 écrans et 1 écran. Le test n'a pas révélé d'effet écran sur le score au SSQ ( $p > .10$ ). L'effet de l'ordre de passation (passage de 1 à 3 et de 3 à 1 écran) a également été vérifié, les résultats n'ont pas révélé d'effet de ce facteur sur le score au SSQ ( $p > .10$ ).

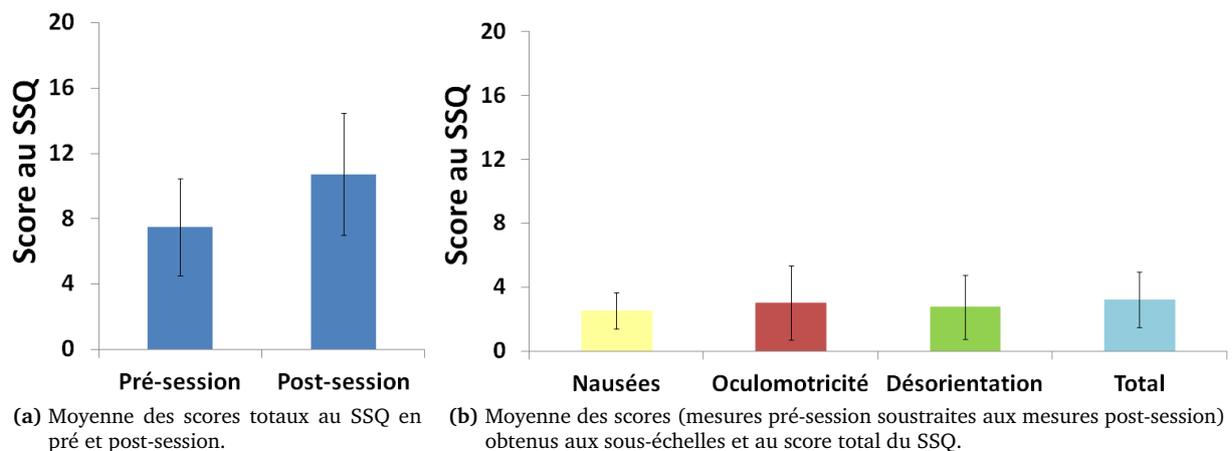


FIGURE 12.5 – Le mal du simulateur. Les scores maximaux sont de 200,34 pour la sous-échelle *nausée*, de 159,18 pour l'*oculomotricité*, de 292,32 pour la *désorientation* et de 235,62 pour le score total au questionnaire. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

### 12.2.3 Discussion

La présente étude avait pour objectif de déterminer comment le côté, la vitesse d'inclinaison, la taille du champ de vision ou encore le couplage présenté entre le roulis visuel et physique influencent la détection.

Tout d'abord, les résultats n'ont indiqué aucun effet de la direction d'inclinaison que ce soit sur la perception du mouvement et de l'inclinaison. Cette absence d'effet est en accord avec les résultats des expériences précédentes et des études antérieures s'intéressant à la perception du mouvement ou

de l'inclinaison dans les simulateurs de vol qui n'ont montré aucun effet du côté d'inclinaison sur les seuils de détection [Benson et al., 1989; Gundry, 1978; Otakeno et al., 2002]. De plus, les résultats n'ont indiqué aucun *effet simulateur* ni de la condition de champ de vision sur les scores au SSQ. Les participants ont déclaré dans l'ensemble peu de symptômes liés au mal du simulateur. Les résultats ont en revanche indiqué un effet robuste de la vitesse de roulis et du couplage roulis visuel/physique présenté sur les seuils de détection mouvement et inclinaison. Les résultats ont également mis en évidence un effet limité du champ de vision dans la tâche de détection de l'inclinaison.

### Détection du mouvement

Les résultats relatifs à la détection du mouvement ont indiqué un effet de la vitesse de roulis sur les réponses des participants : plus la vitesse de roulis augmente, plus le temps de détection du mouvement diminue et plus l'angle au moment de la réponse augmente. Nos résultats semblent également indiquer que cette détection du mouvement atteint un plateau (asymptote) à partir de la vitesse de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$ , le temps mis pour détecter le mouvement ne se différenciant plus de façon significative au-delà de cette vitesse. L'effet de la vitesse de roulis, du couplage roulis visuel/physique testé et l'absence d'effet du champ de vision sont discutés séparément dans les paragraphes suivants.

***Effet de la vitesse de roulis sur le temps de réponse*** Comme pour les expériences précédentes, l'effet de la vitesse de roulis sur le temps de réponse suit une loi de Piéron, qui modélise la relation entre le temps de réponse à un stimulus et l'intensité de ce dernier. Le temps de réponse diminue ainsi comme une fonction de puissance de l'intensité de la stimulation (voir figure 12.6). Plusieurs études rendent compte d'une relation similaire entre le temps de réponse et l'intensité du stimulus, qu'il soit exprimé en termes de vitesse ou accélération angulaire [Clark, 1967; Gundry, 1978; Meiry, 1965]. Pour une discussion détaillée de ce résultat, nous renvoyons le lecteur à la discussion de l'expérience 1 (chapitre 7).

Cependant, alors que dans les expériences 1 et 2 la détection du mouvement atteint un plateau à partir de  $4 \text{ deg.s}^{-1}$ , cette étude corrobore les résultats de l'expérience 4 et montre que le temps de réponse ne diminue plus significativement à partir d'une vitesse de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$ . Toutefois, les vitesses d'inclinaison de la plate-forme mobile diffèrent entre les deux premières expériences et cette étude. Ceci peut expliquer en partie la différence de résultat au niveau de la vitesse de roulis pour laquelle un plateau est atteint. D'après les valeurs de roulis obtenues à partir de la centrale inertielle, le fait qu'une sollicitation des canaux semi-circulaires apparaisse avant cette vitesse de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$  (dès  $0,5 \text{ deg.s}^{-1}$ ) peut expliquer que le temps de réponse ne diminue plus de manière significative et atteint ainsi un plateau. La diminution du temps de réponse est également conditionnée (limitée) par le fait que le temps de réaction humain à un stimulus est constant. La détection du mouvement semble ainsi constituer un phénomène principalement dynamique, les participants répondant à la détection du mouvement en s'appuyant principalement sur la cinématique du mouvement signalée par les détecteurs de vitesse angulaire (les canaux semi-circulaires). De plus, en raison de l'éloignement de l'axe de rotation de la tête du conducteur, les organes otolithiques répondent également à une accélération latérale tangentielle dont la valeur s'établit au dessus du seuil des capteurs vestibulaires à partir de la vitesse d'inclinaison de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$  (voir section 6.2.2 pour le profil des accélérations et vitesses produites par la plate-forme mobile). Toutefois, comme pour les expériences précédentes, les participants ont déclaré en fin d'expérience avoir répondu à la détection du mouvement en raison principalement des vibrations émises par les vérins lors de l'inclinaison du simulateur, suggérant également la sollicitation des récepteurs somesthésiques pour la détection du mouvement. La

contribution des récepteurs somesthésiques à la détection du mouvement est suggérée par Mallery et al. [2010].

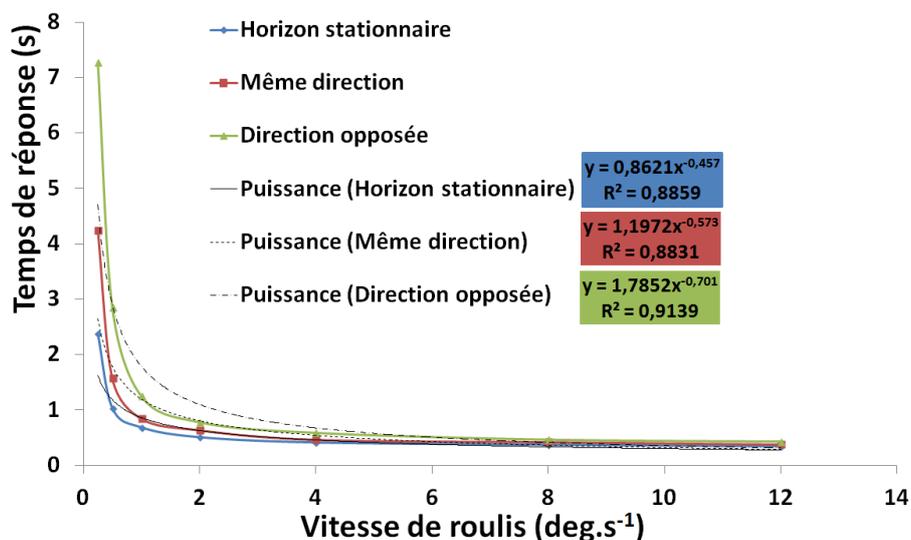


FIGURE 12.6 – Temps de détection du mouvement (s) en fonction de la vitesse de roulis. Le temps de réponse suit une fonction puissance quel que soit le couplage roulis visuel/physique présenté. Pour chacune des conditions de couplage, est présentée l'équation de la fonction puissance ainsi que le  $r^2$  associé : l'encadré bleu représente l'équation et le  $r^2$  pour la condition « Horizon stationnaire », alors que les encadrés rouge et vert concernent ceux obtenus pour la condition « même direction » et « direction opposée » respectivement.

**Effet robuste du couplage entre le roulis visuel et physique présenté sur le temps de réponse** Notre étude a mis en évidence que les participants détectaient significativement plus tôt le mouvement lorsque l'horizon était stationnaire comparativement aux conditions où l'horizon était incliné. Toutefois, l'interaction entre la condition de couplage et la vitesse d'inclinaison a montré que cette influence du couplage roulis visuel/physique sur le temps de réponse était établie seulement pour les vitesses d'inclinaison les plus faibles (0,25 et 0,5 deg.s<sup>-1</sup>). Ce résultat peut être expliqué par le fait que les individus se sont appuyés principalement sur les informations inertielles et proprioceptives pour détecter le mouvement plutôt que les informations visuelles. En effet, bien que la vitesse de roulis global (visuelle + physique) ait été identique pour chacun des couplages, les vitesses de chaque dimension (visuelle et physique) étaient différentes, ceci pouvant expliquer un temps de réponse différant en fonction de la condition de couplage présentée. Les conducteurs ont ainsi détecté plus tardivement du mouvement pour les conditions impliquant une inclinaison de l'horizon puisque les vitesses d'inclinaison de la plate-forme mobile étaient inférieures en comparaison à la condition « horizon stationnaire ». De même, les conducteurs ont détecté plus tardivement le mouvement dans la condition où l'horizon s'inclinait dans la direction opposée à celle du simulateur que dans la condition impliquant une inclinaison de l'horizon dans la même direction que le simulateur. Ce résultat peut également s'expliquer par l'utilisation de vitesses de roulis physique plus faibles dans la première condition de couplage (direction opposée) que dans la seconde, ceci en raison de la valeur du gain implémentée dans le modèle de restitution de roulis.

**Absence d'effet du champ de vision sur le temps de réponse** Les résultats ont également montré que la taille du champ de vision n'influait pas le temps de détection du mouvement. Ce résultat va

dans le sens de nos hypothèses et suggère que les participants fondent leur détection principalement sur les informations inertielles et proprioceptives plutôt que sur les informations visuelles centrales ou périphériques.

### Détection de l'inclinaison

Les résultats relatifs à la tâche de détection de l'inclinaison ont mis en évidence un angle de roulis global moyen minimum de détection allant de 4,16 à 8,82 degrés selon la condition de couplage testée (angle moyen de roulis global de 6,42 degrés pour l'ensemble des conditions). De plus, un effet robuste de la vitesse de roulis a été indiqué dans cette tâche de détection de l'inclinaison. Plus la vitesse de roulis augmentait, plus le temps de réponse diminuait et plus l'angle au moment de la réponse augmentait. Toutefois, les résultats ont souligné l'apparition d'un plateau à partir de 2 deg.s<sup>-1</sup>, le temps de réponse ne diminuant plus de manière significative au-delà de cette vitesse. En revanche, les résultats ont montré que l'angle au moment de la réponse augmentait de manière significative à partir de cette vitesse de roulis. En deçà de cette vitesse de 2 deg.s<sup>-1</sup>, l'angle au moment de la réponse n'apparaissait pas augmenter significativement. Principalement attendu, ces résultats sont identiques à ceux obtenus lors de l'expérience 1. Pour une discussion complète de l'effet de ce facteur sur le temps de réponse et l'angle au moment de la détection de l'inclinaison, nous renvoyons le lecteur à la discussion de l'expérience 1 (section 7.4, p. 118). D'autre part, la tâche de détection de l'inclinaison a mis en évidence un effet de la condition de couplage roulis visuel/physique sur le temps de réponse et sur l'angle au moment de la réponse. Enfin, les résultats ont montré un effet d'interaction du facteur champ de vision à la fois sur le temps de réponse et sur l'angle au moment de la détection. Chacun de ces résultats est discuté séparément dans ce qui suit.

**Angle de roulis global moyen minimum de détection de 6,42 degrés** Les résultats ont mis en évidence un angle de roulis global moyen minimum de détection de l'inclinaison de 6,42 degrés ( $\pm 3,85$  degrés). Plus précisément, l'angle de roulis global moyen de détection semble varier selon la condition de couplage entre le roulis visuel et physique testée. L'angle de roulis global moyen minimum de détection de l'inclinaison est ainsi de 4,16 degrés pour la condition « horizon stationnaire », alors qu'il est, respectivement de 6,28 et 8,82 degrés pour les conditions « même direction » et « direction opposée ». Alors que pour la condition « horizon stationnaire », l'angle moyen minimum de détection correspond à l'angle de roulis physique puisqu'aucun roulis visuel n'est restitué, pour les conditions « même direction » et « direction opposée », il est à noter que l'angle de roulis global seuil est partagé entre un angle de roulis visuel (respectivement, de 2,43 et 5,73 degrés) et un angle roulis physique (respectivement, de 3,85 et 3,08 degrés).

Ces angles de roulis physique sont supérieurs aux angles de roulis physique rapportés dans la littérature [Gundry, 1978; Otakeno et al., 2002; Young, 1984], qui se situent autour de 2 degrés, et également au seuil identifié lors nos expériences précédentes. Alors que la même vitesse d'inclinaison (0,25 deg.s<sup>-1</sup>) était utilisée dans cette expérience (condition « horizon stationnaire ») et dans les expériences précédentes, l'angle de roulis minimum est dans cette étude (4,16 degrés) un peu plus du double de l'angle minimum de détection identifié lors des deux premières expériences (respectivement, de 1,72 et de 2 degrés), et est également supérieur à l'angle de détection identifié en expérience 4C dans la même condition de couplage (2,79 degrés).

Cette différence de résultat peut provenir des modifications survenues au niveau du dispositif mais également de la méthodologie expérimentale. En effet, contrairement aux expériences précédentes, les

lumières de la salle d'expérimentation étaient éteintes et l'illumination de la salle provenait seulement de la luminosité des images projetées sur les écrans. Dès lors, seules les informations visuelles restituées par les images projetées sur les écrans étaient disponibles, contrairement aux études antérieures où les participants pouvaient fonder leur détection sur l'ensemble des informations visuelles présentes dans la pièce. La différence de résultat peut également provenir de la modification de la taille du champ visuel vertical, qui était plus important dans cette étude en comparaison aux précédentes expériences (champ visuel vertical de 80 et 54 degrés, respectivement). L'origine de cette différence de résultat est à investiguer dans de futures études.

***Effet du couplage entre le roulis visuel et physique sur le temps de réponse et l'angle au moment de la réponse*** Comme pour la détection du mouvement, les résultats ont mis en évidence que les participants détectaient significativement plus tôt le mouvement lorsque l'horizon était stationnaire comparativement aux conditions où l'horizon était incliné. Toutefois, l'interaction entre la condition de couplage et la vitesse d'inclinaison a montré que cette influence du couplage roulis visuel/physique sur le temps de réponse était établie seulement pour les vitesses d'inclinaison les plus faibles (0,25 et 0,5 deg.s<sup>-1</sup>). De même, l'angle de roulis global au moment de la réponse semble également influencé par le couplage présenté. Pour l'ensemble des vitesses d'inclinaison, l'angle de roulis global au moment de la détection de l'inclinaison était ainsi plus faible dans la condition où l'horizon était stationnaire en comparaison aux conditions où l'horizon s'inclinait ; l'angle de roulis global étant plus important dans la condition impliquant une inclinaison de l'horizon dans la direction opposée au sens du virage.

Ces résultats peuvent être expliqués, comme pour la détection du mouvement, par le fait que les individus se sont appuyés principalement sur les informations inertielles et proprioceptives pour détecter l'inclinaison plutôt que sur les informations visuelles. En effet, bien que la vitesse de roulis global (visuelle + physique) fût identique pour chacun des couplages, les vitesses de chaque dimension (visuelle et physique) étaient différentes, ceci pouvant expliquer un temps de réponse et un angle de détection différant en fonction de la condition de couplage présenté.

***Effet du champ de vision sur le temps de détection et l'angle au moment de la détection de l'inclinaison*** Alors que nous attendions une diminution du seuil de détection de l'inclinaison (détection plus rapide et tôt) avec l'augmentation de la taille du champ visuel horizontal, les résultats ont montré qu'un rôle modéré de ce facteur sur le seuil de détection de l'inclinaison. En effet, aucun effet principal du champ de vision n'a été révélé sur le temps de détection et sur l'angle au moment de la détection de l'inclinaison. Cependant, les résultats sur l'angle au moment de la réponse ont révélé que l'interaction entre le champ de vision et le couplage roulis visuel/physique était significative, suggérant, seulement pour la condition « direction opposée », une détection plus rapide (angle plus faible) pour le champ de vision large que pour le champ de vision limité. De même, l'interaction entre ce facteur, le couplage roulis visuel/physique et la vitesse de roulis sur le temps de réponse, qui approchait le seuil de significativité, suggérait que le temps mis pour détecter l'inclinaison était plus important lorsque le champ de vision était limité (1 écran) que lorsque le champ de vision était large (3 écrans), seulement pour la condition de couplage « direction opposée » pour une vitesse d'inclinaison de 0,25 deg.s<sup>-1</sup>. Ces premiers résultats semblent aller dans le sens de notre hypothèse, l'apport d'informations périphériques augmenterait la sensibilité au roulis et donc diminuerait le temps de réponse ainsi que l'angle au moment de la détection. Ces résultats corroborent ceux de différentes études qui ont montré que l'apport d'informations périphériques pouvait favoriser la détection du mouvement propre [Huang et Young, 1981], la sensation d'inclinaison [Allison et al., 1999] et influencer la perception de l'orientation dans l'espace [Eriksson et

von Hofsten, 2005]. Toutefois, ces résultats nécessitent d'être confirmés dans de futures études.

**En résumé**, nos résultats suggèrent qu'une vitesse de roulis minimale de  $1 \text{ deg.s}^{-1}$  est nécessaire pour que le mouvement de la moto soit ressenti immédiatement pendant la conduite. En revanche, pour permettre un ressenti d'inclinaison en situation de conduite par le mouvement du simulateur, les stratégies de commande devraient intégrer une vitesse minimum de roulis de  $2 \text{ deg.s}^{-1}$  et un angle de roulis global minimum moyen allant de 4,16 à 8,82 degrés selon la condition de couplage entre le roulis visuel et physique utilisée.

## 12.3 Expérience 6B : Perception de la chute

### 12.3.1 Méthode

#### 12.3.1.1 Participants

Vingt-sept motocyclistes (27 hommes et 0 femme, âge moyen = 35,5 ans ; ET = 9,3 ans ; nombre moyen d'années de permis = 9,1 ans, ET = 6,4 ans ; nombre moyen de kilomètres parcourus par an = 17500 km/an, ET = 12531 km/an) ont participé à cette étude.

#### 12.3.1.2 Dispositif expérimental et tâche

L'expérience a été réalisée avec le même dispositif de restitution visuelle et inertielle que précédemment (voir expérience 6A, section 12.2.1.2), le roulis physique maximum restant toujours limité à 12,5 degrés. Sur le modèle des expériences 1 et 4, les participants ont réalisé une tâche de perception de la chute. Les participants devaient ici également fournir leurs réponses en utilisant les mêmes boutons que précédemment.

Chaque essai débutait également avec le simulateur (plate-forme et horizon visuel) dans une position d'origine à 0 degré de roulis. Après deux secondes d'attente, le simulateur s'inclinait jusqu'à ce que la plate-forme mobile ait atteint son angle de roulis maximum, que le participant ait répondu ou non. Une fois le roulis maximum atteint, le simulateur maintenait l'angle de roulis instantané pendant une seconde puis se replaçait automatiquement dans sa position d'origine à une vitesse de  $8 \text{ deg.s}^{-1}$ .

#### 12.3.1.3 Plan expérimental

Comme dans l'expérience 6A, ont été manipulés :

- 1) la taille du champ visuel horizontal (60 ou 180 degrés) ;
- 2) le couplage entre le roulis visuel et physique (couplage « même direction », « direction opposée » ou « horizon stationnaire ») ;
- 3) la vitesse d'inclinaison en roulis (1, 4, 16, 32 et  $48 \text{ deg.s}^{-1}$ ). Les vitesses de roulis visuel et physique pour chacune des conditions sont présentées dans le tableau 12.2 ;
- 4) et le côté d'inclinaison.

Le plan expérimental 5 vitesses (1, 4, 16, 32 et  $48 \text{ deg.s}^{-1}$ ) x 2 côtés d'inclinaison (gauche et droite) x 3 couplages roulis visuel/physique (« même direction », « direction opposée » et « horizon stationnaire ») x 2 tailles du champ de vision horizontal (1 et 3 écrans) résultait en 60 conditions expérimentales différentes.

TABLE 12.2 – Distribution des vitesses de roulis ( $\text{deg.s}^{-1}$ ) global entre le roulis visuel et le roulis physique selon le couplage roulis visuel/physique testé.

Horizon stationnaire			Couplage « même direction » Gain : 0,63		Couplage « direction opposée » Gain : 1,86	
Roulis global	Roulis visuel	Roulis physique	Roulis visuel	Roulis physique	Roulis visuel	Roulis physique
1	–	1	0,39	0,61	0,65	0,35
4	–	4	1,55	2,45	2,60	1,40
16	–	16	6,18	9,82	10,41	5,59
32	–	32	12,37	19,63	20,81	11,19
48	–	48	18,55	29,45	31,22	16,78

Note : Les vitesses du roulis visuel et physique ( $\text{deg.s}^{-1}$ ) ont été obtenues à partir des relations suivantes : vitesse de roulis visuel ( $\text{deg.s}^{-1}$ ) = (Vitesse Totale  $\times$  Gain) / (Gain + 1) et vitesse de roulis physique ( $\text{deg.s}^{-1}$ ) = (Vitesse Totale  $\times$  1) / (Gain + 1).

#### 12.3.1.4 Procédure

Dès leur arrivée au laboratoire, les participants ont pris connaissance des différentes informations relatives à l'expérience et à son déroulement avant de signer le formulaire de consentement. Ils ont ensuite complété un questionnaire informel portant sur leur pratique du deux-roues et le SSQ. Les participants ont également rempli le Questionnaire sur la Propension à l'Immersion (ITQ-F; Robillard et al., 2003) qui est une version française validée du questionnaire *Immersive Tendencies Questionnaire* [Witmer et Singer, 1998]. Ce questionnaire (voir Annexe E) qui se compose de 18 items mesure la propension des individus à s'immerger dans un monde virtuel.

Enfin, l'expérimentateur leur présentait le simulateur et ses différents constituants avant de leur expliquer le principe de la tâche à effectuer et de procéder à une session de familiarisation. Au cours de cette session, les participants ont réalisé six essais d'entraînement pour chacune des conditions de couplage, avec deux directions d'inclinaison et trois vitesses de roulis (20, 30 et 40  $\text{deg.s}^{-1}$ ). Pour cette session d'entraînement, la condition champ de vision a été présentée de façon contrebalancée. Au cours de cette session comme de l'expérience proprement dite, la pièce était sans lumière et les participants portaient leur casque moto. Après s'être assuré que le principe de la tâche était clair et compris des participants, l'expérimentation débutait.

Pour la tâche proprement dite, les participants devaient effectuer 3 essais par condition expérimentale. Cela résultait en un total de 180 essais (répartis en 12 blocs de 15 essais). L'ordre de passation de la condition champ de vision (1 et 3 écrans) était contrebalancé entre les participants. Ainsi, la moitié des participants a débuté par la condition champ de vision 1 écran et la seconde moitié par la condition champ de vision 3 écrans (la moitié de chacun de ces sous-groupes a réalisé l'entraînement avec la condition champ de vision de 1 ou 3 écrans). Pour chaque taille de champ de vision, les participants ont donc réalisé 2 blocs d'essais pour chaque condition de couplage roulis visuel/physique, soit au total 6 blocs d'essais qui étaient présentés de façon aléatoire. A l'intérieur des deux blocs d'une même condition de couplage, la vitesse de roulis et le côté d'inclinaison étaient présentés également de façon aléatoire.

Une pause était observée après chaque bloc d'essais, et au moment du changement de champ de vision. Au moment du changement de champ de vision et à la fin de l'expérience<sup>2</sup>, les participants ont

2. En fin d'expérience les participants ont également réalisé un test de catégorisation (voir expérience 4, section 10.2.3) afin de déterminer le couplage préférentiel des participants avec pour objectif d'étudier l'influence du couplage préférentiel sur le seuil de perception de la chute. Sur les vingt-sept participants, seize préféraient le couplage « direction opposée », six préféraient le couplage « même direction », et cinq participants ont utilisé préférentiellement le couplage « horizon stationnaire ». Toutefois,

de nouveau rempli le questionnaire du mal du simulateur. A la fin de l'expérience, les participants ont réalisé le test du cadre et de la baguette, appelé communément le *Rod and Frame Test* (RFT, Witkin et Asch, 1948), qui catégorise les individus le long d'un continuum allant de dépendant au champ visuel (DC) à indépendant au champ visuel (IC). La méthodologie relative à ce test est détaillée dans la section suivante. La session complète a duré 2 h approximativement.

### 12.3.1.5 Le test du cadre et de la baguette (RFT, *Rod and Frame Test*).

Le test du cadre et de la baguette permet d'établir le degré de dépendance au champ visuel. Les personnes dépendantes au champ visuel (DC) s'appuient plutôt sur les informations visuelles (qu'elles soient statiques ou dynamiques) alors que les personnes indépendantes au champ visuel (IC) se fondent préférentiellement sur les informations proprioceptives (égocentrées - vecteur idiotropique ou axe Z), ou sur les informations gravito-inertielles (vestibulaires). Pour distinguer ces deux sous-cadres de référence, une inclinaison de la tête et/ou du corps des participants est généralement pratiquée durant la réalisation du test [Golomer et al., 2005; Guerraz et Poquin, 1998]. Lors de ce test, les participants étaient en station debout face à un cylindre noir (60 cm de diamètre x 105 cm de long), lui-même placé face à un écran de projection (1,88 m de large x 2,40 m de haut). L'écran était positionné à une distance totale de 1,46 m des participants. L'affichage des stimuli visuels (baguette et/ou cadre) sous-tendait un angle visuel horizontal de 32 degrés (figure 12.7).

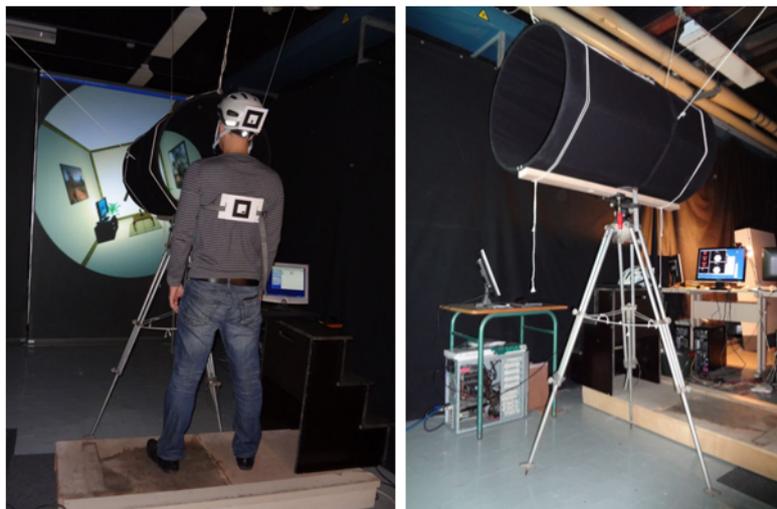


FIGURE 12.7 – Dispositif du test du cadre et de la baguette.

Les participants étaient positionnés de façon à ce que leurs yeux soient au centre du cylindre et qu'aucune information périphérique (en dehors du cylindre) ne soit perceptible. Une estrade en bois amovible et dont la hauteur pouvait être ajustée était utilisée à cet effet. Sur l'écran était affiché soit un environnement visuel incliné (cadre de 65,5 cm de côté) représentant une pièce meublée (*i.e.*, condition cadre incliné, voir figure 12.8a), soit un environnement neutre sans informations de verticalité (*i.e.*, condition sans cadre, voir figure 12.8c). Une baguette (43 cm de long x 2,5 cm de large) était positionnée au centre de chaque environnement (figure 12.8). La baguette et le cadre étaient orientés de 18 degrés à droite ou à gauche. Cette valeur correspond au degré d'inclinaison connu pour produire un pic maximum d'erreur

l'hétérogénéité des patterns de réponse mis en évidence par la fonction logistique (3 groupes de 5 ou 6 participants) n'a pas permis la réalisation d'analyses statistiques avec le facteur *groupe* (couplage préférentiel).

[Zoccolotti et al., 1992]. La baguette était inclinée soit dans la même direction que le cadre soit dans la direction opposée à celui-ci (lorsque ce dernier était présent).

La tâche des sujets était de réajuster la baguette à la verticale physique (la verticale gravitaire), en présence de cadres de référence (visuels, gravito-inertiel et égocentriques) perturbés du fait de l'inclinaison de l'environnement visuel et par le changement de position du corps et de la tête des individus. Pour cela, il était demandé aux participants d'utiliser les touches directionnelles du clavier positionné à leur hauteur par pression avec le majeur et l'index seulement (la main du sujet était positionnée avant que le test commence). Aucune limite de temps n'était imposée. Une fois que les participants jugeaient la baguette comme étant à la verticale gravitaire, ces derniers devaient l'annoncer verbalement afin que l'expérimentateur valide leur réponse puis présente l'essai suivant. Entre deux essais, un environnement bruité (voir figure 12.8b) était présenté afin de limiter l'effet mémoire des participants.

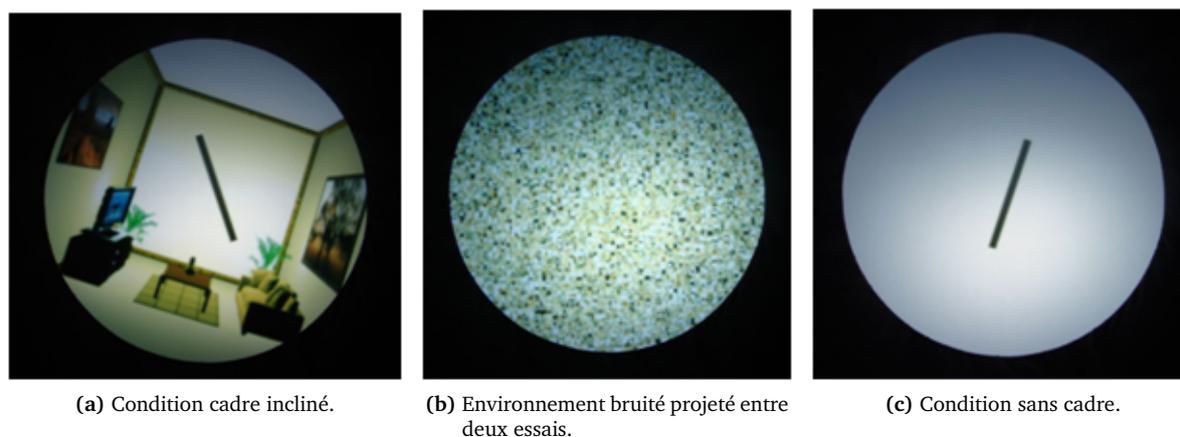
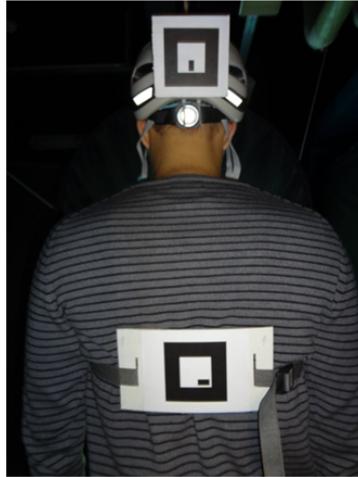


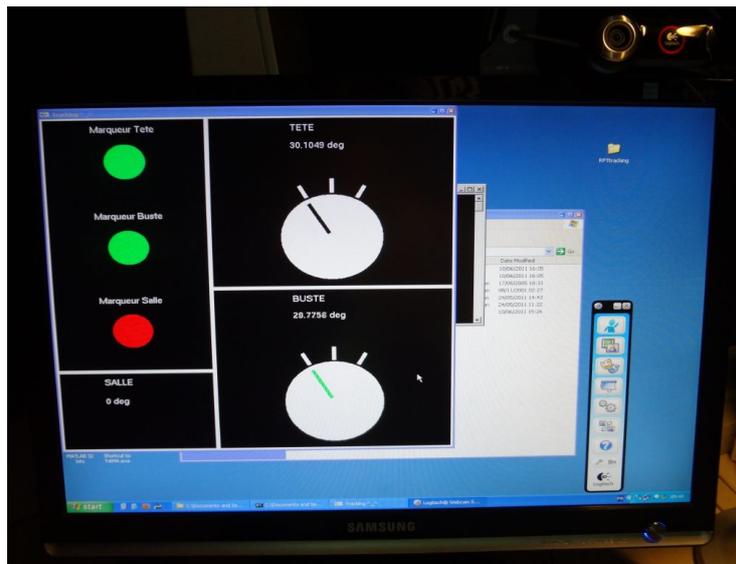
FIGURE 12.8 – Environnement visuel projeté lors du test du cadre et de la baguette.

Lors de ce test, ont été manipulés quatre conditions posturales : (i) **tête et corps droits** ; (ii) **corps droit et tête inclinée** (de 28 degrés vers la gauche ou la droite), afin de perturber essentiellement le cadre de référence vestibulaire et dans un degré moindre le cadre de référence égocentrique via la modification des angles articulaires et la déviation du centre de masse ; (iii) **tête droite et corps incliné** (de 28 degrés vers la gauche ou la droite), qui nous permettait de modifier le cadre de référence égocentrique (modification des angles articulaires et déviation du centre de masse) sans affecter l'information vestibulaire ; (iv) **tête et corps inclinés** (de 28 degrés vers la gauche ou la droite), afin de modifier à la fois le cadre de référence vestibulaire et le cadre de référence égocentrique.

Afin de contrôler et de s'assurer du respect des exigences des conditions posturales (degré d'inclinaison ou de verticalité), les participants portaient un casque de vélo sur lequel était accroché (à l'arrière de celui-ci) une image (marqueur) dont l'orientation était détectée et enregistrée par une webcam positionnée derrière le sujet. Ce système permettait ainsi de contrôler l'orientation de la tête (figure 12.9). De même, pour contrôler l'orientation du corps (buste), les participants était équipé d'un système similaire où le marqueur était fixé sur une ceinture que les participants devaient attacher au niveau du buste. Le marqueur positionné ainsi dans le haut du dos de la personne était également enregistré par la webcam (figure 12.10). Les différentes valeurs d'orientation du corps et de la tête du participant étaient affichées sur ordinateur. Ce système de capteurs de position permettait ainsi à l'expérimentateur de positionner correctement le participant selon les conditions expérimentales et de le corriger en temps réel.



**FIGURE 12.9** – Les deux marqueurs (tête et buste) positionnés sur le participant. Ces marqueurs sont utilisés pour contrôler les quatre positions posturales à adopter par le participant pour le test du cadre et de la baguette.



**FIGURE 12.10** – Système de suivi des positions de la tête et du corps du participant au moyen d'une webcam (en haut à droite de la photographie). A gauche de la photographie, chaque marqueur (tête et buste) est associé à un cercle rempli. Lorsque ce cercle est vert, le marqueur est bien détecté par la webcam, en revanche lorsque le cercle est de couleur rouge le marqueur n'est pas détecté par la webcam. Le marqueur salle est utilisé comme référence de verticalité (il n'est pas positionné sur le participant) et est toujours à 0 degré. L'amplitude de l'inclinaison de chaque marqueur est détaillée à gauche de la même fenêtre, avec la valeur chiffrée de l'amplitude présentée en haut de chaque cercle blanc. Au sommet de ces cercles, apparaissent trois traits blancs représentant les trois positions possibles à atteindre : (i) inclinaison vers la gauche de 28 degrés ; (ii) la verticale physique, 0 degré d'inclinaison ; (iii) inclinaison vers la droite de 28 degrés. Partant du centre du cercle, un curseur se déplace le long du cercle en fonction du déplacement (inclinaison) du marqueur. Lorsque ce curseur est de couleur verte, le marqueur est alors positionné correctement, avec une erreur de position de  $\pm 2$  degrés, à l'une des trois positions possibles. Au-delà de 2 degrés d'erreur avec la position testée, le curseur est de couleur noire.

Pour chaque condition posturale (au nombre de 7), les participants réalisaient un total de 8 essais (2 essais x 2 directions d'inclinaison du cadre x 2 directions d'inclinaison de la baguette) pour la condition cadre incliné et un total de 4 essais (2 essais x 2 directions d'inclinaison de la baguette) pour la condition sans cadre. Les conditions cadre incliné et sans cadre étaient réalisées séparément. Ainsi, le test comprenait 14 conditions expérimentales résultant en un total de 84 essais. Les déviations en degrés de la baguette par rapport à la verticale gravitaire étaient mesurées pour chaque ajustement avec les déviations sur la gauche considérées comme positives et celles sur la droite comme négatives. La réalisation de ce test durait 30 minutes approximativement.

### 12.3.1.6 Analyse des données

Les réponses positives (*i.e.*, perception de la chute) ont été traitées à partir de la fonction logistique afin d'identifier la vitesse de roulis à laquelle la transition entre percevoir et ne pas percevoir s'opère et la pente de la courbe. L'angle de roulis global au moment de la réponse a également été mesuré.

Ces différentes variables dépendantes ont été analysées à partir d'une ANOVA Vitesse de roulis x Côté d'inclinaison x Couplage roulis visuel/physique x Champ visuel. Le niveau de significativité a été fixé à 0,05 pour toutes les analyses statistiques. La taille de l'effet ( $\eta^2$ ) est également rapportée. Lorsque nécessaire, le test post-hoc de Newman-Keuls a été utilisé afin de déterminer les différences significatives.

### 12.3.2 Résultats

Les analyses réalisées avec la direction de l'inclinaison comme variable indépendante n'ont révélé aucun effet significatif (principal ou d'interaction) sur la perception de la chute. Ce facteur a donc été exclu des analyses suivantes.

Les données d'un participant qui n'a pu compléter la session entière en raison des symptômes associés au mal du simulateur ont été exclues des analyses. De plus, les données d'un participant incohérent dans ces réponses à la perception de la chute ont été exclues des analyses.

Une première représentation des résultats (pourcentage de réponse positive, *i.e.*, chute perçue, en fonction de la vitesse de roulis ; voir la figure 12.11) a permis de mettre en évidence différents patterns de réponse :

- Un groupe de participants ( $n=5$ ) a perçu une sensation de chute de moins en moins fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis pour l'ensemble des conditions de champ de vision et de couplage. La régression logistique, réalisée pour chaque condition de champ de vision et chaque condition de couplage mais indépendamment de la direction de l'inclinaison, a mis en évidence pour ce groupe une transition entre ne pas percevoir et percevoir la chute pour une vitesse seuil de  $5,30 \text{ deg.s}^{-1}$  ( $ET = 4,52 \text{ deg.s}^{-1}$ ). Ce résultat indique que ce groupe a ressenti une chute dans 50 % des cas jusqu'à une vitesse seuil de  $5,30 \text{ deg.s}^{-1}$ . L'analyse de régression logistique a d'autre part révélé, pour ce groupe, une pente négative (pente de  $-0,69 \text{ deg.s}^{-1}$  à la vitesse seuil ;  $ET = 1,76 \text{ deg.s}^{-1}$ ) compte tenu du pattern de réponse (groupe nommé « *transition négative* »).

Afin de déterminer l'effet de la condition de champ de vision et du couplage entre le roulis visuel/physique pour ce groupe, une ANOVA 2 champs de vision x 3 couplages roulis visuel/physique a été appliquée sur la vitesse seuil ainsi que sur la pente de la courbe à cette vitesse. Les résultats ont révélé un effet du couplage roulis visuel/physique,  $F(2, 8) = 4.67, p < .05, \eta^2 = .53$ , et un effet du champ de vision sur la vitesse seuil,  $F(1, 4) = 7.9, p < .05, \eta^2 = .66$ , mais aucun effet d'interaction entre ces facteurs ( $p > .10$ ). Pour le couplage roulis visuel/physique, le test post-hoc

sur l'effet principal a mis en évidence que la vitesse seuil était significativement plus élevée dans la condition « direction opposée » ( $M = 9,27 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $ET = 5,67 \text{ deg.s}^{-1}$ ) que dans la condition « horizon stationnaire » ( $M = 2,22 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $ET = 1,35 \text{ deg.s}^{-1}$ ). D'autre part, alors que les résultats n'ont pas montré de différences significatives sur la vitesse seuil entre les conditions de couplage « horizon stationnaire » et « même direction », il semble que la vitesse seuil était plus faible en condition « même direction » ( $M = 4,38 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $ET = 1,64 \text{ deg.s}^{-1}$ ) que dans la condition « direction opposé » ( $p = 0.07$ ). Pour le champ de vision, les résultats ont indiqué que la vitesse seuil était significativement plus élevée lorsque les participants étaient exposés à un champ de vision large en comparaison au champ de vision limité ( $M = 5,83$  et  $4,76 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $ET = 4,53$  et  $4,59 \text{ deg.s}^{-1}$  pour, respectivement, un champ de vision de 180 degrés et de 60 degrés). Les résultats n'ont pas révélé d'effets principaux ou d'interaction de ces facteurs sur la pente à cette vitesse ( $p > .10$ ).

- Un second groupe de participants ( $n = 5$ ) a montré un pattern de réponse opposé, la probabilité de percevoir une chute augmentant avec la vitesse de roulis, mais seulement pour les conditions de couplage « horizon stationnaire » et « même direction ». Les individus de ce groupe (ainsi que l'ensemble des participants de l'étude) n'ont pas adopté ce pattern de réponse (mais les patterns « ne répond jamais » ou « transition négative ») lorsque la condition de couplage impliquait l'horizon incliné dans la direction opposée au simulateur. La régression logistique a mis en évidence pour ce groupe une vitesse seuil de  $30,47 \text{ deg.s}^{-1}$  ( $ET = 8,61 \text{ deg.s}^{-1}$ ) pour une pente positive de  $2,29 \text{ deg.s}^{-1}$  ( $ET = 2,99 \text{ deg.s}^{-1}$ ) à cette vitesse (groupe nommé « *transition positive* »). Ce résultat indique donc que, à partir d'une vitesse de roulis de  $30,47 \text{ deg.s}^{-1}$  en moyenne, ces participants ont ressenti une sensation de chute dans 50 % des cas. Comme précédemment, une ANOVA 2 champs de vision x 2 conditions de couplage roulis visuel/physique a été appliquée sur la vitesse seuil ainsi que sur la pente de la courbe à cette vitesse afin de déterminer l'effet de la condition de champ de vision et du couplage roulis visuel/physique. Les résultats ont révélé un effet de la condition de couplage roulis visuel/physique sur la vitesse seuil,  $F(1, 4) = 115.43$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .96$ , mais aucun effet principal et d'interaction du champ de vision ( $p > .10$ ). La vitesse seuil était significativement plus élevée dans la condition « même direction » ( $M = 37,18 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $ET = 5,17 \text{ deg.s}^{-1}$ ) que dans la condition « horizon stationnaire » ( $M = 23,77 \text{ deg.s}^{-1}$ ,  $ET = 5,46 \text{ deg.s}^{-1}$ ). Les résultats n'ont en revanche pas révélé d'effet de ces facteurs sur la pente à cette vitesse ( $p > .10$ ).
- Un groupe de participants ( $n=6$ ), malgré quelques réponses positives (trois participants n'ont jamais répondu, deux ont répondu 1 fois et le participant restant a répondu 4 fois sur 180 essais), n'a pas ressenti de chute (groupe « *ne répond jamais* »).
- Les 9 participants restants ont produit des patterns de réponse différents en fonction du champ de vision et/ou du couplage roulis visuel/physique auxquels ils étaient exposés (voir tableau 12.3).

Enfin, nous nous sommes intéressés à l'angle de roulis global au moment de la réponse. Pour chaque sujet des groupes « transition positive » et « transition négative », nous avons calculé l'angle de roulis global « seuil » correspondant à la vitesse de transition (au .50) déterminée par la fonction logistique. A cette fin, une fonction logarithmique a été dressée à partir des valeurs d'angles de roulis global obtenues pour chaque réponse donnée en fonction de la vitesse d'inclinaison. Pour chaque condition de couplage roulis visuel/physique et condition de champ de vision, l'angle de roulis global « seuil » a alors été calculé à partir de l'équation de la régression et de la vitesse de transition seuil déterminée précédemment par la fonction logistique (le .50).

TABLE 12.3 – Patterns de réponse à la perception de la chute en fonction du champ de vision et du couplage entre le roulis visuel et physique, pour les neuf participants produisant des patterns de réponse non constants à travers les conditions expérimentales.

Sujets	Champ de vision de 60 degrés (1 écran)			Champ de vision de 180 degrés (3 écrans)		
	HS	MD	DO	HS	MD	DO
S1	TN	TN	Profil en U	TN	TN	TN
S2	TP	JMS	JMS	JMS	JMS	JMS
S3	TN	TN	TN	TP	TN	TN
S4	JMS	JMS	JMS	TN	TN	TN
S5	JMS	TN	TN	JMS	JMS	TN
S6	TP	JMS	TN	TP	JMS	TN
S7	JMS	TN	TN	JMS	TN	TN
S8	TP	JMS	TN	JMS	TP	JMS
S9	TP	JMS	JMS	TP	JMS	JMS

Note : HS : couplage « Horizon stationnaire », MD : couplage « Même direction », DO : couplage « Direction opposée », TN : pattern « transition négative », TP : pattern « transition positive », JMS : pattern « ne répond jamais », profil en U : la fonction logistique n'a pu analyser ces données, le participant ayant répondu se sentir chuter aux basses et hautes vitesses mais non aux vitesses intermédiaires.

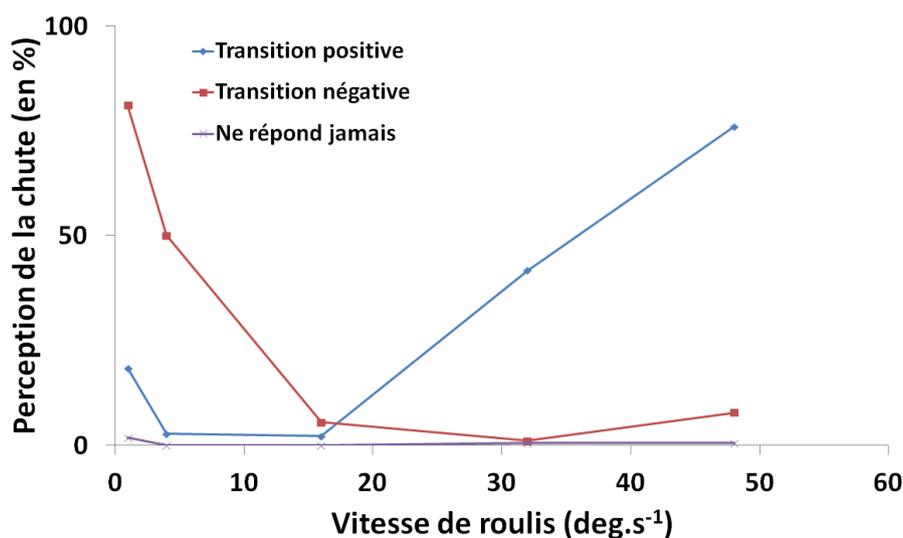


FIGURE 12.11 – Pourcentage de perception de la chute en fonction de la vitesse de roulis et des trois principaux patterns de réponse mis en évidence par la fonction logistique.

Une ANOVA 2 champ de vision x 3 conditions de couplage roulis visuel/physique et une ANOVA 2 champ de vision x 2 conditions de couplage (« même direction » et « horizon stationnaire »), pour le groupe « transition négative » et « transition positive » respectivement, ont été appliquées sur l'angle de roulis global seuil afin de déterminer l'effet de la condition de couplage roulis visuel/physique et l'effet du champ de vision. Pour ces groupes « transition négative » et « transition positive », les résultats ont révélé un effet du couplage sur l'angle de roulis global seuil (respectivement,  $F(2, 8) = 257, 81, p < .001, \eta^2 = .98$  et  $F(1, 4) = 70, 97, p < .01, \eta^2 = .95$ ), mais aucun effet de la condition champ de vision ( $p > .10$ ). Pour le groupe « transition négative », les résultats ont montré que l'angle de roulis global seuil était plus élevé pour le couplage « même direction » ( $M = 18,74^\circ, ET = 1,06^\circ$ ) que pour le couplage « horizon sta-

tionnaire » ( $M = 11,62^\circ$ ,  $ET = 0,88^\circ$ ) et était encore plus important pour le couplage « direction opposée » ( $M = 32,44^\circ$ ,  $ET = 3,56^\circ$ ). De même, pour le groupe « transition positive », les résultats ont montré que l'angle de roulis global seuil était plus élevé dans la condition « même direction » ( $M = 18,12^\circ$ ,  $ET = 3,66^\circ$ ) que dans la condition « horizon stationnaire » ( $M = 11,48^\circ$ ,  $ET = 2,12^\circ$ ). Les angles de roulis global seuil pour chacun des deux groupes sont présentés en fonction de la condition de couplage roulis visuel/physique et du champ de vision dans le tableau 12.4.

**TABLE 12.4** – Moyenne des angles de roulis global seuil (somme des angles du roulis visuel et physique, en degré) correspondant à la vitesse de transition seuil en fonction du champ de vision (1 écran et 3 écrans) et de la condition de couplage roulis visuel/physique (« horizon stationnaire », « même direction » et « direction opposée »), pour les deux groupes « transition négative » (groupe TN) et « transition positive » (groupe TP) mis en évidence par la fonction logistique.

Pattern de réponse		Champ de vision de 60 degrés (1 écran)								
		Horizon stationnaire			Même direction			Direction opposée		
		Angles de roulis								
		global	visuel	physique	global	visuel	physique	global	visuel	physique
Groupe TN		11,24	–	11,24	19,12	7,39	11,73	31,09	20,22	10,87
Groupe TP		11,22	–	11,22	18,30	7,07	11,23	–	–	–

Pattern de réponse		Champ de vision de 180 degrés (3 écrans)								
		Horizon stationnaire			Même direction			Direction opposée		
		Angles de roulis								
		global	visuel	physique	global	visuel	physique	global	visuel	physique
Groupe TN		12,00	–	12,00	18,36	7,10	11,26	33,78	21,97	11,81
Groupe TP		11,75	–	11,75	17,94	6,93	11,01	–	–	–

Note : groupe TN : groupe « transition négative », groupe TP : groupe « transition positive », le sigle ‘–’ signale qu’aucun angle de roulis seuil n’a été mis en évidence pour le groupe transition positive lors de la condition de couplage « direction opposée » puisqu’aucun des participants de ce groupe (et de l’expérience) n’a adopté ce type de réponse (transition positive) pour cette condition de couplage.

### Identification de l’origine des patterns de réponse à la perception de la chute

Afin d’identifier l’origine des différents patterns de réponse à la perception de la chute (« transition négative », « transition positive » et « ne répond jamais »), nous avons cherché à déterminer parmi les variables potentiellement explicatives émises en hypothèse (voir section 7.4), celles qui expliquaient principalement ces patterns de réponse. Les variables testées étaient ainsi (figure 12.5) :

- 1) le nombre de chutes auxquels les motocyclistes ont été exposés sur route,
- 2) l’expérience de conduite,
- 3) et le style perceptif - cadres de référence préférentiels visuel, gravitaire ou égocentré.

L’expérience de conduite (nombre d’années de permis moto) ainsi que le nombre de chute ont été renseignés par le participant au moyen d’un questionnaire généraliste sur leur pratique de conduite motocycliste en début de session expérimentale. Le style perceptif quant à lui était déterminé au moyen des réponses obtenues (erreurs par rapport à la verticale) lors du test du cadre et de la baguette, réalisé en fin de session expérimentale. Le style perceptif est analysé au travers des trois scores obtenus lors

du test de cadre et de la baguette : le score de l'effet du cadre visuel (l'inclinaison du cadre reflète la dépendance visuelle, dit « effet cadre »), le score de l'effet de l'inclinaison de la tête (reflétant la dépendance vestibulaire, dit « effet tête ») et le score de l'effet de l'inclinaison du buste (reflétant la dépendance égocentrée, dit « effet buste »).

Une quatrième variable, le score de propension à l'immersion (ITQ-F), se présente également comme un candidat potentiel pour expliquer ces patterns de réponse et a ainsi été également testé. En effet, plusieurs études ont montré que le niveau de présence ressentie dans un environnement virtuel était médié par la propension à s'immerger dans cet environnement. Or, le sentiment de présence produit, chez l'individu, un sentiment d'« exister » à l'intérieur du monde virtuel. L'individu est alors « coupé » du monde réel et capable d'ignorer ou intégrer à l'expérience virtuelle certains événements extérieurs perturbants et distrayants (e.g., bruit, mouvement du simulateur). Toutefois, ce mouvement peut également rompre son sentiment de présence si ce dernier n'est pas assimilé à l'expérience vécue dans l'environnement virtuel. Nous émettons ainsi l'hypothèse que les conducteurs qui ont tendance à s'immerger dans un environnement virtuel seront moins sensibles à la perception de la chute ressentie physiquement mais seront en revanche plus sensibles à la chute ressentie visuellement lorsque l'horizon visuel s'incline. Nous supposons donc que les participants du groupe « ne répond jamais » sont majoritairement des individus avec un degré de propension à l'immersion élevé, à l'inverse les participants des groupes « transition négative » et « transition positive » sont plutôt des individus peu sensible à l'immersion en environnement virtuel (faible degré de propension à l'immersion).

TABLE 12.5 – Tableau de données des différentes variables explicatives émises en hypothèses pour expliquer le pattern de réponse à la chute (codé par le nombre de réponses positives à la chute).

Pattern de réponse à la chute	Nombre de réponses positives	Nombre de Chute	Score ITQ-F	Années de permis moto	Effet cadre	Effet tête	Effet buste
Transition négative	52	1	74	10	4,37	-0,77	-0,
Transition négative	53	1	65	4	1,20	-1,55	-0,45
Transition négative	40	0	53	6	14,43	-1,25	-1,60
Transition négative	57	1	80	11	0,38	-4,12	-0,12
Transition négative	60	5	62	23	3,62	-2,98	-0,15
Ne répond jamais	0	0	66	3	5,80	-0,15	-0,92
Ne répond jamais	1	2	73	7	2,40	-0,72	0,12
Ne répond jamais	0	1	93	31	8,70	-1,97	-2,35
Ne répond jamais	0	2	82	18	2,65	-2,95	0,25
Ne répond jamais	1	4	67	12	0,85	-2,18	-0,43
Ne répond jamais	4	1	56	19	2,42	-3,00	-0,33
Transition positive	57	0	67	1	1,05	0,15	0,18
Transition positive	40	10	62	4	3,07	1,42	-1,33
Transition positive	51	6	45	22	3,65	0,85	-1,07
Transition positive	46	1	67	18	5,95	22,18	1,60
Transition positive	60	1	65	1	1,20	0,00	-0,67

Une régression multiple a été appliquée avec le pattern de réponse à la perception de la chute (nombre de réponses positives) comme variable à expliquer et les facteurs nombre de chute, nombre d'années de permis moto, score de propension à l'immersion et scores associés au style perceptif comme variables explicatives, afin de tenter d'expliquer le fait de percevoir ou de ne pas percevoir de chute.

L'analyse a été réalisée seulement sur les données des participants conservant le même pattern de réponse à travers les différentes conditions expérimentales (groupe « transition positive », « transition négative » et « ne répond jamais »). Les résultats de la régression n'ont pas révélé de modèle significatif ( $p > .10$ ). Aucun Bêta n'était significatif entre les facteurs testés et la variable à expliquer. Par conséquent, les résultats ont indiqué que les facteurs de la chute testés ne permettaient pas de prédire (expliquer) le nombre de réponses positives à la chute, c'est-à-dire d'expliquer le fait de percevoir ou non la chute.

De la même manière, afin d'identifier l'origine des deux patterns de réponse « transition positive » et « transition négative », une régression multiple a été réalisée avec le pattern de réponse à la perception de la chute (codé par la vitesse de transition seuil) comme variable à expliquer et avec les mêmes facteurs explicatifs que précédemment. Une nouvelle fois, les résultats n'ont pas révélé de modèle significatif ( $p > .10$ ), suggérant que les facteurs de la chute testés ne permettaient pas d'expliquer ces deux patterns de réponse à la chute.

### Scores au SSQ

Le mal du simulateur a été évalué au début de la session et après chaque condition de champ de vision au moyen du SSQ. D'un point de vue descriptif, nous pouvons constater que les scores (calculés en soustrayant les mesures pré-expérimentales des mesures post-expérimentales) obtenus aux différentes sous-échelles sont assez faibles (figure 12.12b).

Toutefois, afin d'investiguer l'effet simulateur sur le score total obtenu au questionnaire, nous avons réalisé un  $t$  de Student sur le score total obtenu en pré et post-session. Le test  $t$  de Student a révélé un effet simulateur significatif sur le score au SSQ,  $t(24) = -2,98, p = .006$ , les symptômes déclarés par les motocyclistes étant plus importants après la session expérimentale qu'à leur arrivée à la session (figure 12.5a).

Afin d'étudier l'effet écran sur le score au SSQ, un test  $t$  de Student a été réalisé en comparant les scores au SSQ 3 écrans et 1 écran. Le test n'a pas révélé d'effet écran sur le score au SSQ ( $p > .10$ ). L'effet de l'ordre de passation (passage de 1 à 3 et de 3 à 1 écran) a également été vérifié, les résultats n'ont pas révélé d'effet de ce facteur sur le score au SSQ ( $p > .10$ ).

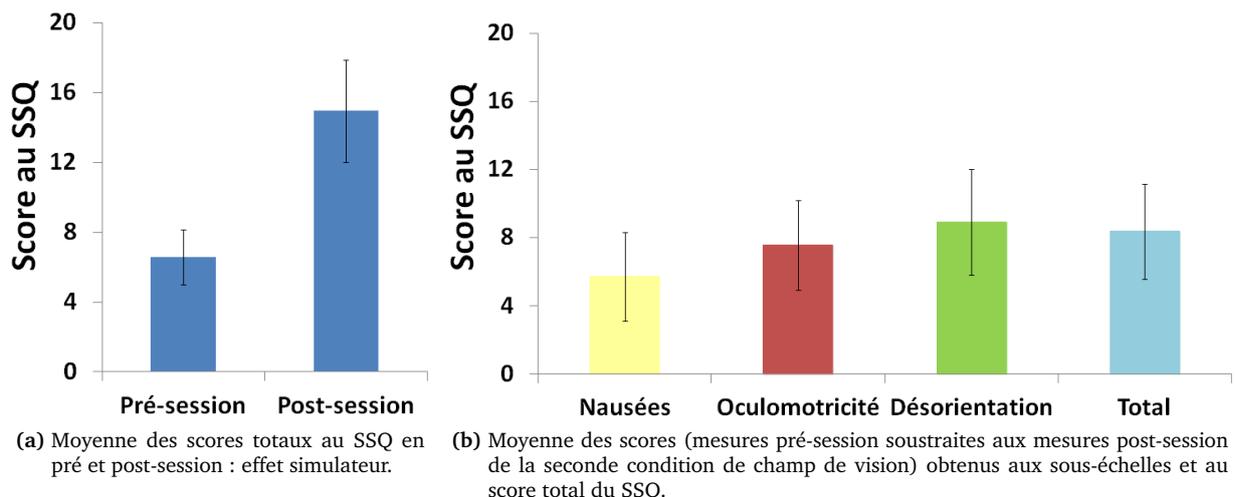


FIGURE 12.12 – Le mal du simulateur. Les scores maximaux sont de 200,34 pour la sous-échelle *nausée*, de 159,18 pour *l'oculomotricité*, de 292,32 pour la *désorientation* et de 235,62 pour le score total au questionnaire. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

### 12.3.3 Discussion

En complément de l'étude précédente, l'objectif de cette étude était de déterminer les caractéristiques du mouvement de roulis pour lesquelles les utilisateurs ne ressentent pas la chute. Nous avons de plus exploré comment certains facteurs, tels que le côté d'inclinaison, la vitesse d'inclinaison, le couplage entre le roulis visuel et physique présenté ou encore la taille du champ de vision influencent la perception de la chute. Tout d'abord, comme pour les études précédentes, les résultats n'ont indiqué aucun effet de la direction d'inclinaison sur la perception de la chute. Les résultats ont en revanche indiqué un effet robuste du couplage roulis visuel/physique présenté sur la vitesse de transition et l'angle de roulis seuil de perception de la chute et un effet du champ de vision seulement sur la vitesse de transition seuil. De plus, comme pour les expériences précédentes, les résultats ont mis en évidence une forte hétérogénéité des patterns de réponse à la chute. Enfin, les résultats ont également montré que les participants étaient exposés au mal du simulateur, même si la sévérité des symptômes était assez faible pour la majorité des participants. Chacun des résultats présentés est discuté séparément dans ce qui suit.

#### *Effet du couplage présenté entre le roulis visuel et physique sur la vitesse et l'angle de roulis seuil*

Les résultats ont mis en évidence que la plage de mouvement de la plate-forme mobile correspondant à la probabilité de chute la plus faible était influencée par le couplage présenté entre le roulis visuel et physique. En effet, alors que pour le couplage présenté « horizon stationnaire », la probabilité la plus faible de perception de la chute se situe entre les vitesses de roulis global de  $2,2 \text{ deg.s}^{-1}$  (vitesse à laquelle la probabilité de détecter passe sous le seuil de .50 pour le groupe « transition négative ») et  $23,8 \text{ deg.s}^{-1}$  (vitesse jusqu'à laquelle la probabilité de détecter reste sous le seuil de .50 pour le groupe « transition positive »), pour le couplage « même direction » la probabilité la plus faible s'étend entre les vitesses  $4,4$  et  $37,2 \text{ deg.s}^{-1}$ . De même, pour le couplage « direction opposée », la probabilité la plus faible de percevoir la chute se situe au-delà de la vitesse de  $9,3 \text{ deg.s}^{-1}$ . Ainsi, la probabilité de percevoir une chute, pour ce couplage « direction opposée », restait inférieure à 50 % lorsque les vitesses dépassaient les  $9,3 \text{ deg.s}^{-1}$ . Ce résultat suggère que les participants sont moins sensibles à la perception de la chute lorsque le couplage présenté entre le roulis visuel et physique implique une inclinaison de l'horizon visuel, et en particulier lorsque le couplage présenté comporte l'horizon incliné dans la direction opposée à l'inclinaison de la plate-forme mobile. Une explication possible à ce résultat peut être le fait que les vitesses de roulis physique testées dans cette condition de couplage « direction opposée » sont plus faibles que dans les autres conditions de couplage puisque les vitesses de roulis global sont partagées entre les dimensions visuelle et physique en fonction du gain identifié lors de l'expérience 5. Nous pouvons également supposer que les participants sont moins sensibles à la chute dans la condition où le couplage entre le roulis visuel et physique présenté est le couplage préférentiel de l'individu. D'après les résultats du test de catégorisation réalisé en fin d'expérimentation, quatre sur les cinq participants choisissent de préférence un couplage entre le roulis visuel et physique impliquant une inclinaison de l'horizon dans la direction opposée au simulateur. Afin de vérifier notre première hypothèse (sensibilité à la chute est fonction de la vitesse de roulis physique et non du pattern visuel présenté), de futures recherches sont nécessaires en manipulant comme variables indépendantes des vitesses de roulis physique identiques au lieu de vitesses de roulis global identiques, comme dans cette présente étude.

De même, les résultats sur l'angle de roulis global seuil ont montré que l'angle de roulis global seuil était plus important pour les couplages impliquant du roulis visuel (angles moyens de  $18,43$  et  $32,44$  degrés pour, respectivement, la condition « même direction » et « direction opposée ») que pour le couplage où l'horizon visuel était stationnaire (angle moyen de  $11,55$  degrés). Cependant, on peut observer

à partir du tableau 12.4 que les angles de roulis physique correspondants aux angles de roulis global seuil sont très proches. En effet, l'angle moyen minimum de roulis physique seuil auquel les participants des deux groupes pointés par la régression logistique déclarent se sentir chuter est de 11,55 degrés pour la condition « horizon stationnaire », de 11,31 degrés pour la condition « même direction » et de 11,34 degrés pour la condition « direction opposée ».

Finalement, l'angle moyen minimum de roulis physique seuil (11,4 degrés) auquel les participants des deux groupes pointés par la régression logistique déclarent se sentir chuter, quel que soit le couplage entre le roulis visuel et physique présenté, est similaire à l'angle mis en évidence lors de l'expérience 4 (angle moyen de 11,5 degrés), dont le dispositif visuel était plus sommaire.

### ***Effet du champ de vision sur la vitesse de transition seuil***

Les résultats ont mis en évidence un effet du champ de vision sur la vitesse de transition seuil, seulement pour le groupe « transition négative » dont la probabilité de ressentir une sensation de chute est plus importante aux faibles vitesses qu'aux hautes vitesses. Alors que pour la condition de champ de vision large, les participants déclaraient ressentir une sensation de chute dans plus de 50 % des cas lorsque les vitesses de roulis étaient inférieures à 5,8 deg.s<sup>-1</sup>, lorsque le champ de vision était limité la probabilité de ressentir une chute était supérieure à 50 % lorsque les vitesses de roulis étaient inférieures à 4,8 deg.s<sup>-1</sup>. Ce résultat suggère que le champ de vision a un impact sur la plage de mouvement (en vitesses de roulis) à restituer, l'augmentation du champ de vision diminuant la plage de mouvement pour laquelle la probabilité de percevoir une sensation de chute est inférieure à 50 %. En revanche, contrairement aux résultats attendus, aucune influence du champ de vision n'a été révélée sur l'angle de roulis global seuil. Ce résultat suggère que l'origine de la perception de la chute serait physique plutôt qu'induite visuellement par une inclinaison de l'horizon.

### ***Hétérogénéité des patterns de réponse à la perception de la chute***

La fonction logistique en dégageant trois modalités différentes de réponse a mis en évidence une forte hétérogénéité dans le ressenti de la chute. Un groupe a ressenti qu'ils tombaient seulement sur quelques essais (de 0 à 4 essais sur 180), alors que pour les deux groupes restants, un groupe a perçu une sensation de chute de plus en plus fréquemment avec l'augmentation de la vitesse de roulis alors que l'autre a ressenti le plus fréquemment une chute aux vitesses les plus faibles. Seulement 16 sur les 25 participants ont ainsi répondu avec un pattern de réponse identique pour l'ensemble des conditions expérimentales. En effet, les 9 participants restants ont changé de patterns de réponse à la perception de la chute en fonction du champ de vision et/ou de la condition de couplage entre le roulis visuel et physique auxquels ils étaient exposés.

Parmi les différentes hypothèses proposées pour expliquer ces différents patterns de réponse, les résultats de la régression multiple ont révélé qu'aucune d'entre elles ne permettaient d'expliquer le fait de percevoir ou non la chute sur simulateur ni d'expliquer l'origine des deux patterns de réponse « transition positive » et « transition négative ». Toutefois, le nombre de participants (n=16) est assez réduit limitant ainsi la puissance des analyses entreprises. De futures études sont donc nécessaires afin de déterminer les variables explicatives pouvant être à l'origine de ces différents patterns de réponse à la perception de la chute sur simulateur moto. L'identification précise de ces facteurs permettraient d'adapter la plage de mouvement de la plate-forme mobile selon le profil du participant (le pattern de réponse adopté) afin d'éviter l'apparition d'une sensation de chute.

### ***Mal du simulateur : effet simulateur***

Bien qu'un participant ait dû abandonner en cours de session expérimentale en raison du mal du simulateur, les scores obtenus (calculés en soustrayant les mesures pré-expérimentales des mesures post-expérimentales) aux différentes sous-échelles du SSQ sont assez faibles. Les résultats ont mis en évidence une augmentation significative du mal du simulateur en fin de session expérimentale en comparaison aux scores obtenus à leur arrivée. Cette augmentation de la sévérité des symptômes peut s'expliquer par la durée de l'expérience (2h). En effet, de nombreuses études ont mis en évidence une relation négative entre la durée des tests expérimentaux et l'augmentation de la sévérité des symptômes du mal du simulateur [Stanney et al., 1998a, 2002]. Enfin, bien que de nombreuses études [Duh et al., 2002; Lin et al., 2002; Kolasinski, 1995] rendent compte d'une augmentation du mal du simulateur avec l'augmentation de la taille du champ de vision, nos résultats n'ont pas révélé d'effet de la condition de champ visuel. L'exposition à un champ de vision large n'a pas produit plus de symptômes du mal du simulateur que lorsque la taille du champ de vision était réduite.

**En résumé**, notre étude montre que le couplage entre le roulis visuel et physique présenté aux motocyclistes influence la sensibilité des individus pour la détection du mouvement, de l'inclinaison et pour la perception de la chute. De plus, la taille du champ de vision semble également influencer la sensibilité des individus au roulis, avec une plus grande sensibilité à la détection de l'inclinaison lorsque le champ de vision latéral est large (180 degrés). Cependant, ce dernier réduit la plage de mouvement (en vitesse) à restituer pour laquelle la probabilité de percevoir la chute est inférieure à 50 %.

Finalement, pour permettre un ressenti d'inclinaison en situation de conduite par le mouvement du simulateur sans ressenti de chute, les stratégies de commande devraient intégrer un angle moyen minimum de roulis physique variant de 3,08 à 4,16 degrés selon le couplage entre le roulis visuel et physique implémenté et un angle maximum moyen de roulis physique de 11,4 degrés approximativement, quel que soit le couplage entre le roulis visuel et le roulis physique.

# Chapitre 13

## Expérience 7 : Evaluation de la validité du simulateur IFSTTAR au travers de la phase de familiarisation et du sentiment de présence.

### 13.1 Motivation et problématique de l'étude

La validation d'un simulateur constitue une étape fondamentale préalable à son utilisation en tant qu'outil de recherche ou de formation et, doit être fonction de l'utilisation que l'on veut en faire [Kaptein et al., 1996]. Ainsi, pour l'étude du comportement du conducteur (comme pour le simulateur IFSTTAR), il apparaît essentiel que le simulateur ait une validité éthologique [Malaterre et Fréchaux, 2001], c'est-à-dire qu'il permette au conducteur d'adopter un comportement sensori-moteur similaire à celui qu'il adopterait en situation réelle. Toutefois, l'étude bibliographique rend compte de difficultés et des coûts importants pour établir cette comparaison entre les comportements observés en situation virtuelle et réelle [Reimer et al., 2006]. Peu d'études de validation établissent ainsi une telle comparaison [Godley et al., 2002; Reimer et al., 2006] et, de plus en plus d'études cherchent à outrepasser celle-ci [Neimer et Mohellebi, 2009]. Récemment, un nouveau concept tend à émerger pour évaluer et qualifier les environnements virtuels : le concept de présence. Le sentiment de présence peut être considéré non seulement comme le sentiment d'exister à l'intérieur de l'environnement virtuel, mais aussi comme la capacité des personnes à répondre à des informations sensorielles générées virtuellement comme si elles étaient réelles [Slater et al., 2009]. Quelques études ont ainsi utilisé ce concept comme un outil pour évaluer des simulateurs de conduite ferroviaire [Tichon et al., 2006; Tichon, 2007] et automobile [Johnson et al., 2011]. Cependant, ces études se limitaient aux situations de conduite générant un état de stress. Pour être valide, le simulateur doit également permettre l'étude du comportement sans toutefois le modifier. C'est la question de l'apprentissage de nouvelle coordination qui est posée. L'évolution du comportement du conducteur durant la phase de familiarisation apparaît ainsi constituer une indication clé de la validité des simulateurs. Cependant, cette période de familiarisation est rarement étudiée [Jamson et Smith, 2003; Kageyama et Tagami, 2002] alors même que la majorité des études en inclut une dans leur protocole expérimental.

Cette étude s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif d'évaluer la validité du simulateur de conduite IFSTTAR, dans son état actuel d'avancement et de manière globale, au travers d'une évaluation objective (*i.e.*, analyse du comportement des conducteurs, durée de familiarisation) et subjective (*i.e.*, degré de présence, mal du simulateur) de trois modèles de conduite (modèles dynamiques de véhicule) dévelop-

pés pour ce simulateur.

L'originalité de cette étude repose sur l'étude de la validité du simulateur d'une part, au travers de la phase de familiarisation, déterminante pour identifier des modifications comportementales et d'autre part, au travers du degré de présence ressenti afin de se soustraire à la comparaison de performances entre situation virtuelle et réelle nécessaire pour évaluer la validité éthologique des simulateurs. Nous supposons donc ici, à partir de la littérature, que le degré de présence ressenti permet de caractériser la capacité des individus à réagir dans l'environnement virtuel comme dans l'environnement réel : un individu ressentant un fort sentiment de présence dans l'environnement virtuel réagira plus probablement à l'intérieur de ce dernier comme s'il s'agissait de la réalité.

En parallèle, nous supposons également que plus le temps de prise en main sera court, plus la conduite du simulateur impliquera des réponses sensori-motrices 'naturelles' du conducteur puisque la phase de familiarisation est intrinsèquement source d'apprentissage de nouvelles coordinations. De plus, nous faisons l'hypothèse que la performance de conduite ainsi que la familiarisation des conducteurs au simulateur différera selon le modèle dynamique de véhicule puisque chacun de ces modèles implique un mode de contrôle de la conduite différent (fondé soit sur des actions de braquage - modèle « braquage » - soit sur des actions de contre-braquage en reposant, dans ce dernier cas, sur des contraintes fonctionnelles de la conduite d'un deux-roues - modèle « fonctionnel F1 » - ou bien sur la dynamique d'une moto réelle - modèle « physique »). A partir des résultats obtenus par Stedmon et al. [2009], nous pouvons supposer que le modèle impliquant un contrôle de la direction par des actions de braquage produira de meilleures performances de conduite par rapport aux modèles dynamiques de véhicule impliquant des actions de contre-braquage. Nous supposons, cependant, que ce modèle sera perçu de manière moins réaliste par les motocyclistes. Enfin, nous émettons l'hypothèse que le modèle reposant sur des contraintes fonctionnelles établies par des motocyclistes experts permettra d'atteindre un comportement plus proche de celui adopté sur une moto réelle que le modèle fondé sur la dynamique d'une moto réelle puisque certains auteurs [Godley et al., 2002; Kaptein et al., 1996; Stoffregen et al., 2003] ont mis en évidence que la validité physique n'était pas nécessaire pour produire une similitude du comportement entre situation réelle et virtuelle.

## **13.2 Méthode**

### **13.2.1 Participants**

Trente-huit motocyclistes (32 hommes et 6 femmes, âge moyen = 32,7 ans, ET = 7,25 ans ; nombre d'années de permis moto = 9,07 ans, ET = 6,36 ans ; nombre moyen de kilomètres parcourus par an = 15681 km/an, ET = 8604 km/an) ont participé à cette étude. Les motocyclistes ont reçu une indemnisation (75 Euros) pour leur participation.

### **13.2.2 Dispositif expérimental et tâche**

L'expérience a été réalisée avec le même dispositif de restitution visuelle et inertiel que précédemment (voir chapitre 11). Toutefois, la restitution inertielle du simulateur était assurée dans cette étude par l'un des trois modèles dynamiques de véhicule développés par l'équipe LEPSiS. Chacun de ces modèles reposait sur un mode de calcul différent de la dynamique de la moto « virtuelle » et incluait le calcul des grandeurs (facteurs d'échelle) à restituer par les actionneurs (et le visuel). L'ensemble des modèles

impliquait une restitution d'une inclinaison de l'horizon visuel dans la direction opposée au virage simulé puisque la majorité des participants des précédentes expériences préféraient ce pattern d'utilisation de l'horizon visuel. Les deux premiers modèles reposaient sur un contrôle de la direction assuré par des actions de contre-braquage, le troisième modèle reposant sur des actions de braquage pour assurer le contrôle de la direction :

- (i) le modèle « **Physique** » était adapté d'un des modèles dynamiques décrits dans Cossalter [2002] et reposait sur les lois de la physique reproduisant ainsi la dynamique d'une moto réelle<sup>1</sup>. Dans ce modèle (figure 13.1), on considère que 3 forces ont une influence sur la rotation de roulis de la moto : la force centrifuge (horizontale et orientée vers l'extérieur du virage), le poids de l'ensemble moto + pilote (vertical et orienté vers le sol) et enfin le moment exercé par le pilote 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.

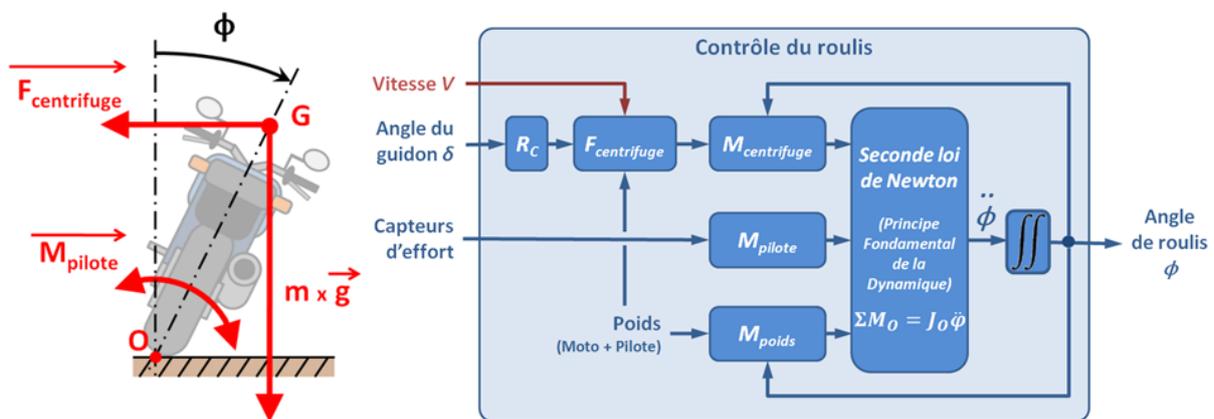


FIGURE 13.1 – Illustration du contrôle en roulis de la moto pour le modèle « Physique ». Note : le rayon de courbure  $R_C$  de la trajectoire dépend de l'angle du guidon  $\delta$  et de l'empattement  $p$  (*i.e.*, distance entre les axes de roues d'une moto : plus celui-ci est important, plus la moto est stable (mais moins maniable)).

- (ii) le modèle « **Fonctionnel F1** » ne reposait pas sur la dynamique d'une moto réelle mais sur les contraintes fonctionnelles 'déclarées' de motocyclistes experts (voir annexe F) reliant les actions réalisées sur la moto aux résultats attendus/voulus en termes de trajectoire (reproduction du « comportement attendu » d'une moto par un motard). La figure 13.2 présente la structure du contrôle en roulis utilisé dans ce modèle permettant de vérifier les différents critères (contraintes fonctionnelles) émis par les motocyclistes experts.

- (iii) le modèle « **Braquage** » restituait l'inclinaison de la moto virtuelle uniquement par une inclinaison de l'horizon visuel, aucun mouvement n'étant restitué par la plate-forme. Ainsi, la moto se contrôlait uniquement avec le guidon, les valeurs renvoyées par les capteurs d'effort n'étant pas prises en compte (voir figure 13.3). Ce dernier modèle de véhicule était similaire à celui mis en œuvre sur le simulateur Honda Riding Trainer.

1. 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.

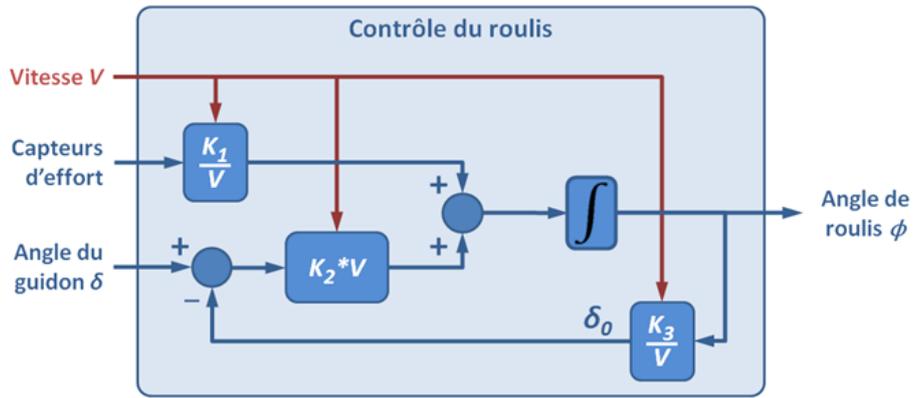


FIGURE 13.2 – Illustration du contrôle en roulis de la moto pour le modèle « fonctionnel F1 ». L'angle de roulis de la moto ( $\phi$ ) est fonction de l'angle du guidon  $\delta$  et des valeurs renvoyées par les capteurs d'effort. Lorsque la vitesse  $V$  de la moto augmente l'action des capteurs est minimisée par le terme  $\frac{K_1}{V}$ , de manière à ce que la moto soit plus stable. En revanche, le terme  $K_2 * V$  augmente l'influence de l'angle du guidon avec la vitesse : l'angle du guidon nécessaire pour incliner la moto diminuant avec la vitesse. L'intégrateur retranscrit l'inertie de la moto et favorise la stabilité du simulateur : les actions sur le guidon et les capteurs d'effort influence la vitesse d'inclinaison de la moto mais non directement sur son inclinaison. Le terme  $\delta_0$  (position guidon de référence) retranscrit le fait que le guidon a tendance à tourner dans le sens du virage.

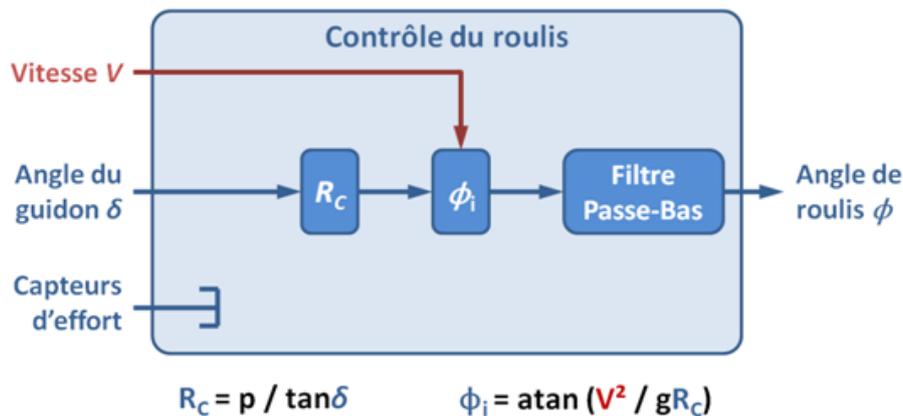


FIGURE 13.3 – Illustration du contrôle en roulis de la moto pour le modèle « braquage ». Le rayon de courbure  $R_C$  de la trajectoire ne dépend que de l'angle du guidon  $\delta$  et de l'empattement  $p$ , et l'angle de roulis est déterminé de sorte à ce que la force centrifuge soit compensée et que la moto soit en « équilibre ».

Les résultats de l'expérience 6 n'ayant pas été analysés avant la réalisation de cette expérience, ces derniers n'ont pas pu être intégrés aux différents modèles dynamiques de véhicule. Le roulis physique maximum a donc été maintenu à 12,5 degrés.

Afin d'implémenter dans chaque modèle de véhicule les résultats de l'expérience 5, liés à l'inclinaison nécessaire à restituer par la plate-forme mobile (gain physique) et par le retour visuel (gain visuel), nous avons cherché à déterminer, par des analyses de régression, les facteurs qui expliquent le mieux les variables dépendantes. Les variables dépendantes étaient le gain physique et le pourcentage d'inclinaison d'une moto réelle (correspondant aux roulis global rapporté à l'inclinaison d'une moto réelle dans la même situation). En raison d'une variabilité interindividuelle importante, la médiane de chacune des variables dépendantes (et pour chaque participant) a été utilisée pour l'analyse de régression.

Les variables explicatives comprenaient l'inclinaison théorique (10, 20 et 30 degrés), le rayon de courbure (150 et 300 m), la vitesse (voir chapitre 9, tableau 9.2) ainsi que la transformation logarithmique de l'ensemble de ces variables. Nous avons menée une régression ascendante-descendante qui présente l'avantage d'éviter l'auto-corrélation entre les variables explicatives.

L'analyse a été réalisée dans un premier temps en prenant en compte l'ensemble des participants de l'expérience 5. Les résultats de l'analyse n'ont pas révélé de résidus normaux. Les régressions n'ont donc pas été validées. Par conséquent, nous avons, dans un second temps, écarté les participants ( $n=5$ ) qui créaient trop de variance et entraînaient l'anormalité des résidus. Pour le gain physique médian, les résultats ont révélé que l'inclinaison théorique ( $IT$ ) et le rayon de courbure ( $RC$ ) expliquaient 34 % de la variance [ $R^2$  ajusté = .34;  $y = -0.01IT + 0.003RC + 0.62$ ]. Les résidus étant normaux ( $W = 0,98; p = 0,402$ )<sup>2</sup>, la régression a été validée. Pour le pourcentage d'inclinaison théorique d'une moto réelle, les résultats ont révélé que les variables  $IT$ ,  $RC$ , vitesse ( $V$ ), logarithme d' $IT$ , logarithme de  $V$  et logarithme de  $RC$  expliquaient 92 % de la variance [ $R^2$  ajusté = .92;  $y = 18.2IT + 4226.2 \log(IT) - 9329.2 \log(V) + 5723.9 \log(RC) - 1,9RC$ ]. Les résidus étant normaux ( $W = 0,98; p = 0,17$ ), la régression a été validée.

Cependant, une fois ces équations intégrées aux modèles dynamiques de véhicule, il est apparu que les gains implémentés au niveau de la plate-forme mobile étaient trop importants pour permettre un contrôle du véhicule, le simulateur se mettant constamment à « guider ». Une des raisons principales pour laquelle les résultats de l'expérience 5 ne semblent pas pouvoir être intégrés aux modèles dynamiques de véhicule est le fait que les participants n'avaient pas le contrôle du guidon durant l'expérience 5 (voir section 11.2 pour plus de détails). Ainsi, ils ont réglé les inclinaisons physiques et visuelles en fonction des contraintes qu'ils avaient à leur disposition et ils n'ont pas, par conséquent, intégré la contrainte du couplage entre les actions sur le guidon et le mouvement de la plate-forme mobile lors de leur réglage.

Par conséquent, les modèles dynamiques de véhicule ont été conservés en l'état, aucune modification n'a été effectuée sur les facteurs d'échelle (gain visuel et physique) de ces modèles. Les facteurs d'échelle avec lesquels chacun des modèles a été élaboré ont été maintenus.

**Pour le modèle « physique »**, les gains visuel et physique varient en fonction de la vitesse de la moto. De 0 à 15 km.h<sup>-1</sup>, le roulis est restitué intégralement par la plate-forme (gain de 1), de cette manière l'horizon visuel reste ainsi stable (stationnaire) lorsque la moto virtuelle est à l'arrêt ou à faible vitesse. Au-delà de 60 km.h<sup>-1</sup>, le roulis est restitué à 80 % visuellement (gain visuel de 0,8) et à 20 % par la plate-forme (gain physique de 0,2). 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<sup>-1</sup>, les pourcentages restitués visuellement et par la plate-forme augmentent linéairement de 0 à 80 % pour le visuel, et diminuent de 100 à 20 % pour la plate-forme. Par conséquent, la somme des angles de roulis restitués physiquement et visuellement équivaut à 100 % du roulis de la moto. L'angle maximum de roulis théorique augmente de 12 à 60 degrés entre les vitesses de 15 et 60 km.h<sup>-1</sup>.

**Pour le modèle « fonctionnel F1 »**, seul le gain visuel varie en fonction de la vitesse de la moto. Comme pour le précédent modèle, le gain visuel augmente linéairement entre les vitesses 15 et 60 km.h<sup>-1</sup>. Pour les vitesses de 0 à 15 km.h<sup>-1</sup> le gain est de 0 et augmente progressivement pour atteindre un gain de 0,5 au-delà de 60 km.h<sup>-1</sup>. En revanche, le gain physique reste fixé à 0,2, la plate-forme restituant ainsi 20 % du roulis théorique. L'angle de roulis maximum théorique est de 70 degrés.

---

2. Evalué par le test de Shapiro-Wilk conçu pour étudier la normalité d'une distribution.

Pour le modèle « braquage », le roulis est restitué seulement visuellement. Le gain physique est donc nul. Le gain visuel est fonction de la vitesse de la moto, augmentant linéairement de 0 à 0,5 entre les vitesses de 0 et 15 km.h<sup>-1</sup>. L'angle de roulis maximum théorique est de 85 degrés.

Reprenant le même dispositif de restitution visuelle que l'expérience 6, la scène visuelle simulée était projetée sur trois écrans (1,88 m de large x 2,40 m de hauteur). Une fois assis sur le simulateur, les participants faisaient face aux écrans à une distance de 1,63 m, les images sous-tendant un angle visuel horizontal et vertical, respectivement, de 180 x 80 degrés. La scène visuelle texturée représentait une route sinueuse de 3,5 m de large composée de deux voies séparées par un marquage axial discontinu (figure 13.4), dans un environnement sans trafic. La chaussée était délimitée par des bandes blanches continues et bordée d'arbres plantés en bord de route. Un compteur avec les indications de vitesse et du rapport de vitesse enclenché était affiché en bas et à droite de l'écran central. La route sinueuse se composait d'une succession de virages à droite ou à gauche (rayon de courbure de 150 ou 300 m, angle de courbure de 30, 60 ou 90 degrés) entrecoupés de lignes droites d'une longueur de 100 m. Comme la longueur des virages est donnée par la relation  $L = R.\theta$  où  $R$  représente le rayon de courbure (en mètres), et  $\theta$  l'angle de courbure en radians, la route sinueuse se composait de virage de 78,5, 157,1, 235,6, 314,2 et 471,2 m. La figure 13.5 représente une vue de dessus de la route sinueuse.



FIGURE 13.4 – Motocycliste en position de conduite sur le simulateur IFSTTAR et faisant face à l'image projetée sur trois écrans. L'inclinaison de la scène visuelle est dans la direction opposée à celle du simulateur.

La tâche des participants était de conduire le simulateur moto comme s'ils conduisaient leur propre véhicule sur une route de campagne. Il leur était précisé que la vitesse était limitée à 90 km.h<sup>-1</sup> comme sur les routes départementales françaises et des panneaux de limitation seraient présents le long de la route. Les participants devaient également indiquer, durant l'expérimentation (en appuyant sur le bouton du klaxon) lorsqu'ils estimaient avoir pris en main le véhicule (*i.e.*, avoir le contrôle du véhicule). Aucune indication de durée ni de retour sur leurs performances ne leur était fournie durant l'expérience. Chaque session de conduite (une session par modèle dynamique de véhicule) durait 20 minutes, que le participant ait répondu ou non avoir pris en main le simulateur.

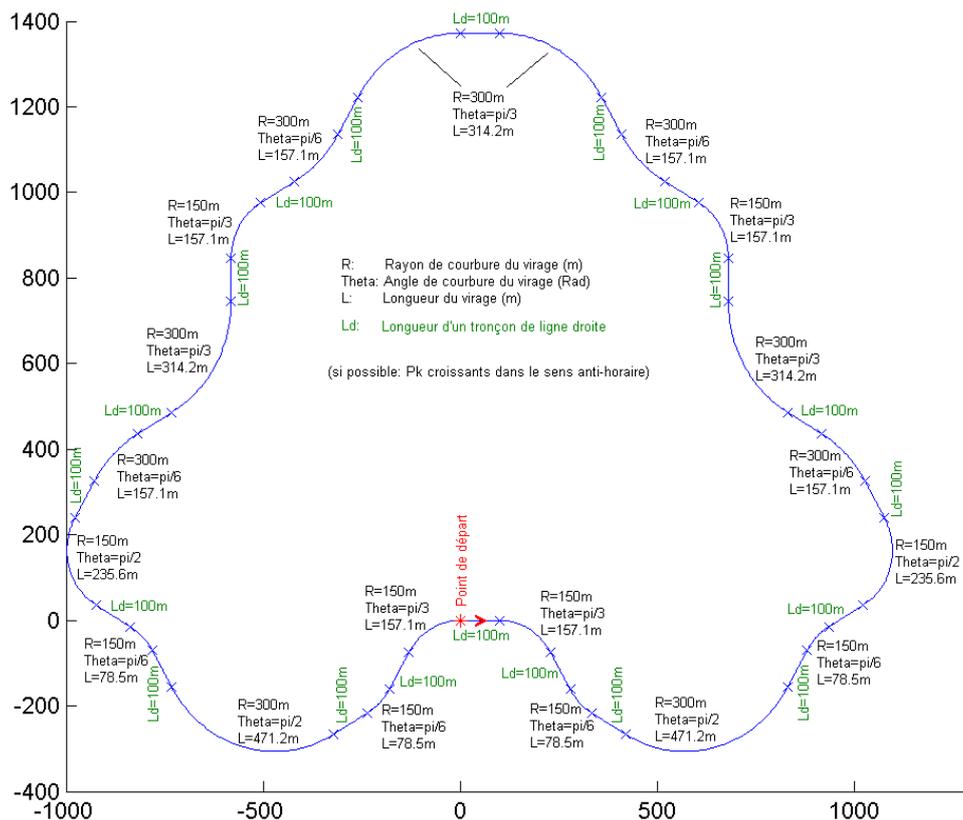


FIGURE 13.5 – Vue de dessus schématique de la route sinueuse.

### 13.2.3 Plan expérimental

Dans cette étude, seul le modèle dynamique de véhicule a été manipulé comme facteur intra-individuel. Le modèle dynamique de véhicule utilisé était soit le modèle « braquage », soit le modèle « physique » ou encore le modèle « fonctionnel F1 ». Le plan expérimental résultait ainsi en 3 conditions expérimentales.

### 13.2.4 Mesures expérimentales

Les mesures expérimentales comprennent des mesures objectives liées au comportement du participant lors des sessions de conduite, et des mesures subjectives relatives à l'expérience vécue dans l'environnement virtuel.

#### 13.2.4.1 Mesures objectives comportementales

- **Mesure du contrôle latéral (de trajectoire)** au travers de :
  - *La variabilité de la position latérale* (en m) qui se définit comme l'écart type de la position latérale du véhicule sur la voie par rapport à la ligne médiane de la route,
  - *Le nombre de sorties de route*,
  - *La durée totale passée en dehors de la route* (en seconde) correspond au temps total accumulé passé en dehors de la route ;
- **Mesure de charge mentale** au travers du *nombre de réversion guidon par minute* (i.e., *Steering Wheel Reversal Rate - SRR*; Engström et al., 2005) qui reflète l'effort fourni par le conducteur pour

- contrôler sa trajectoire ;
- **Mesure de contrôle longitudinal** au travers de :
  - *La vitesse moyenne ( km.h<sup>-1</sup>),*
  - *Le nombre d'arrêt du véhicule (vitesse nulle) ;*
- **Le temps objectif de prise en main** (ou durée de familiarisation objective) correspondant au temps où à la fois la variabilité de la position latérale sur la voie ainsi que le nombre de réversion guidon par minute (*i.e.*, SRR) se stabilisent à une certaine valeur seuil.

#### 13.2.4.2 Mesures subjectives

- **Le temps subjectif de prise en main** (durée de familiarisation subjective) correspondant au temps écoulé entre le démarrage du véhicule (signalé par un appui sur le bouton démarreur) et l'appui sur le klaxon signalant le moment où le sujet a estimé avoir pris en main le véhicule.
- **Le score obtenu au questionnaire sur l'état de Présence** (PQ-F, Robillard et al., 2003) qui est une version française validée du questionnaire *Presence Questionnaire* de Witmer et Singer [1998] comportant 24 items évalués à partir d'une échelle à 7 points et comportant différentes sous-échelles (réalisme, possibilité d'agir qualité de l'interface, possibilité d'examiner, auto-évaluation de la performance, auditif et haptique). En accord avec les critiques formulées par Slater [1999], nous ne considérons pas ce questionnaire comme une mesure du sentiment de présence mais nous l'employons dans notre étude afin de connaître le positionnement de l'utilisateur par rapport à l'environnement virtuel et d'acquérir des données utiles relatives à la nature de l'expérience dans l'environnement virtuel (voir page 66 et Annexe D pour plus de détails sur ce questionnaire) ;
- **Le score au questionnaire de présence** avec le questionnaire *Slater Usuh Steed Questionnaire* (SUS, Slater et al., 1994a). Nous utilisons la dernière version de ce questionnaire développé par Slater et al. [1995a] ou encore Slater et al. [1998], que nous avons adapté en français et qui est composé de 6 questions évaluées à partir d'une échelle à 7 points (voir page 67 et Annexe C pour plus de détails sur ce questionnaire) ;
- **Le score au questionnaire de mal du simulateur** (SSQ, Kennedy et al., 1993) (voir Annexe B) ;
- **Le questionnaire de prédisposition au mal des transports** (*Motion Sickness History Questionnaire* - MSHQ ; Kennedy et Fowlkes, 1992) évaluant la prédisposition des personnes aux malaises provoqués par des environnements mobiles variables au travers de neuf items (bateau, voiture, train, autocar, métro, avion, ascenseur, hamac et manège) (voir Annexe A) ;
- **Le questionnaire sur la Propension à l'Immersion** (ITQ-F ; Robillard et al., 2003) qui est une version française validée du questionnaire *Immersive Tendencies Questionnaire* [Witmer et Singer, 1998] (voir Annexe E) ;
- **Le classement des différentes configurations du simulateur** (modèles dynamiques de véhicule) **en fonction du réalisme** (*e.g.*, quelle configuration du simulateur vous a paru similaire à celle d'une vraie moto : au niveau de la réaction de la moto à vos actions ou de la similarité des mouvements de la moto) ;
- **Le classement des différentes configurations du simulateur en fonction de leur préférence personnelle** (*e.g.*, quelle configuration j'ai préférée ou le moins préférée) ;
- **Le classement des différentes configurations du simulateur en fonction de la facilité de conduite.**

### 13.2.5 Procédure

Une fois arrivés au laboratoire, les participants ont dans un premier temps pris connaissance des différentes informations relatives à l'expérience et à son déroulement avant de signer le formulaire de consentement. Ils ont ensuite complété un questionnaire informel portant sur leur pratique du deux-roues, le questionnaire de propension à l'immersion (ITQ-F), le questionnaire de prédisposition au mal des transports (MSQH) ainsi que le questionnaire du mal du simulateur (SSQ). Enfin, l'expérimentateur leur présentait le simulateur et ses différents constituants avant de leur expliquer le principe de la tâche à effectuer pour chacune des trois sessions de conduite. L'ordre de passation des différents modèles de conduite était contrebalancé entre les participants.

La passation de chaque modèle de véhicule correspondait à une session de conduite de 20 minutes, interrompue par une pause de 1 à 2 minutes permettant la réalisation d'un enregistrement de données à mi-parcours. Entre chaque session de conduite, une pause de 20 minutes était observée afin de permettre aux participants de compléter les différents questionnaires. Il était demandé aux participants de signaler à l'expérimentateur dès que des symptômes nauséux ou de désorientation apparaissaient. Si tel était le cas, l'expérimentateur mettait fin à la session de conduite<sup>3</sup>.

A la fin de chaque session de conduite, les participants ont de nouveau rempli les questionnaires SSQ, PQ-F et SUS. De plus, un débriefing était réalisé afin de connaître les commentaires des participants à la fois sur le réalisme de la simulation (*e.g.*, est-ce que la réponse de la moto à mes actions était similaire à celle de ma moto ?) et sur la contrôlabilité du simulateur (*e.g.*, est-ce que j'arrivais à suivre la trajectoire voulue ?). A la fin de la dernière session de conduite, en sus des trois questionnaires et du débriefing, les participants devaient établir un classement des trois modèles dynamiques du véhicule virtuel testés en fonction du réalisme, de leur préférence personnelle et de leur facilité à conduire. Il leur était précisé qu'ils ne pouvaient pas mettre de scores *ex-æquo* pour deux configurations du simulateur. Enfin, trente minutes après la dernière session de conduite, les participants devaient de nouveau remplir le SSQ afin de s'assurer que ceux-ci ne déclaraient pas de symptômes. La session complète a duré 3 h approximativement.

### 13.2.6 Analyse des données

En raison de problèmes techniques survenus sur le simulateur, les données de deux participants ont été exclues de l'ensemble des analyses. De plus, un grand nombre de participants n'a pas complété l'ensemble des trois sessions de conduite de 20 minutes en raison du mal du simulateur ressenti. En effet, alors que 29 sur les 36 participants (80 %) ont complété les 20 minutes de la première session de conduite, seules 21 personnes (58 %) ont réalisé les deux premières sessions de conduite et uniquement 17 participants ont complété l'ensemble des trois sessions de conduite, soit seulement 47 % des participants.

Selon notre plan expérimental, une analyse avec le modèle dynamique comme facteur intra-individuel sur la population de ces 17 participants devrait être menée. Cependant, le contrebalancement non homogène qui résultait ne nous permettait pas de réaliser des analyses avec ce facteur intra-individuel. Toutefois, afin de rendre compte de l'avis de ces 17 participants sur la comparaison des différents mo-

---

3. Dans le cas où un participant présentait en cours d'expérience plusieurs symptômes qualifiés de sévères dans l'échelle du SSQ, ce dernier était informé (au préalable dans la feuille de consentement éclairé et par oral par l'expérimentateur) qu'il ne pouvait quitter les locaux de l'expérience qu'une heure après la dernière session de conduite et seulement après avoir rempli de nouveau le SSQ. De manière générale, l'ensemble des participants était informé que malgré l'absence ou la disparition de symptômes associés au mal du simulateur, il était possible que certains symptômes comme des troubles de la vision puissent survenir quelques heures suivant l'expérience.

dèles dynamiques de véhicule, les résultats relatifs aux classements des modèles dynamiques de véhicule (comme facteur intra-individuel) établis en fonction des critères de réalisme, de préférence personnelle et de facilité de conduite seront présentés.

Par conséquent, seules les données des participants ayant complété la première session de conduite dans sa totalité ( $n = 29$ ) ont été retenues pour les analyses. De ces 29 participants, 8 ont conduit avec le modèle « fonctionnel F1 » (7 hommes et 1 femme), 12 avec le modèle « braquage » (10 hommes et 2 femmes) et 9 avec le modèle « physique » (9 hommes). Une ANOVA à une voie n'a révélé aucune différence significative entre ces 3 groupes de participants, au niveau de l'âge [ $F(2, 26) = 0.10, p = 0.90$ ], du nombre d'années de permis moto (expertise) [ $F(2, 26) = 0.38, p = 0.69$ ], du nombre de kilomètres parcourus par an en moto [ $F(2, 26) = 0.17, p = 0.85$ ], du score de prédisposition au mal des transports [ $F(2, 26) = 2.09, p = 0.14$ ] et du score de propension à l'immersion [ $F(2, 26) = 0.18, p = 0.83$ ]. Nous avons donc considéré les trois groupes comme homogènes vis-à-vis des différentes caractéristiques mesurées et analysées. Les différentes variables dépendantes (voir section 13.2.4) ont été analysées à partir d'une ANOVA.

Les mesures comportementales, liées au contrôle latéral et longitudinal ou encore à la charge mentale, ont été analysées à partir d'une ANOVA à mesures répétées selon un plan mixte composé de la variable intra-individuelle *temps de conduite* (0-5, 5-10, 10-15 et 15-20 minutes) et de la variable interindividuelle *modèle dynamique de véhicule* ; ce afin de déterminer l'évolution de la performance de conduite (et de la charge mentale induite) au cours du temps et de comparer ces performances entre les différents modèles dynamiques de véhicule conduits par les participants. Les mesures subjectives (temps subjectif de prise en main du véhicule, PQ-F, SUS, SSQ) ont, quant à elle, été analysées à partir d'une ANOVA avec le modèle dynamique de véhicule comme facteur interindividuel.

Le niveau de significativité a été fixé à 0,05 pour toutes les analyses statistiques. La taille de l'effet ( $\eta^2$ ) est également rapportée. Lorsque nécessaire, le test post-hoc de Newman-Keuls a été utilisé afin de déterminer les différences significatives.

### 13.3 Résultats

Nous avons constaté que les neuf participants qui ont conduit sous le modèle « physique » ont maintenu une inclinaison de la plate-forme mobile du simulateur sur le côté droit durant l'essentiel du temps de conduite (incluant le passage sur les lignes droites et les virages de côté gauche), alors même que trois d'entre eux aient répondu s'être familiarisé. La figure 13.6 présente l'angle de roulis visuel (inclinaison de l'horizon visuel), physique (inclinaison de la plate-forme mobile) et global (somme des roulis visuel et physique) adopté par l'un de ces participants (le sujet n°10), en fonction du temps de conduite. Sur cette figure 13.6, à partir de 6 min (360 s) de conduite approximativement on peut constater que le participant a maintenu une inclinaison de la plate-forme mobile (roulis physique) quasi-continue sur le côté droit et ce jusqu'à la fin des dix premières minutes de conduite (600 s), alors que ce participant n°10 a répondu avoir pris en main le simulateur un peu après huit minutes de conduite (520 s).

Par conséquent, les données de ces participants (et donc la variable modèle « physique ») ont été exclues des analyses des mesures comportementales suivantes. Toutefois, ces données ont été conservées pour les analyses des mesures subjectives (PQ-F, SUS, SSQ et classement des modèles) afin de rendre compte du ressenti de ces participants.

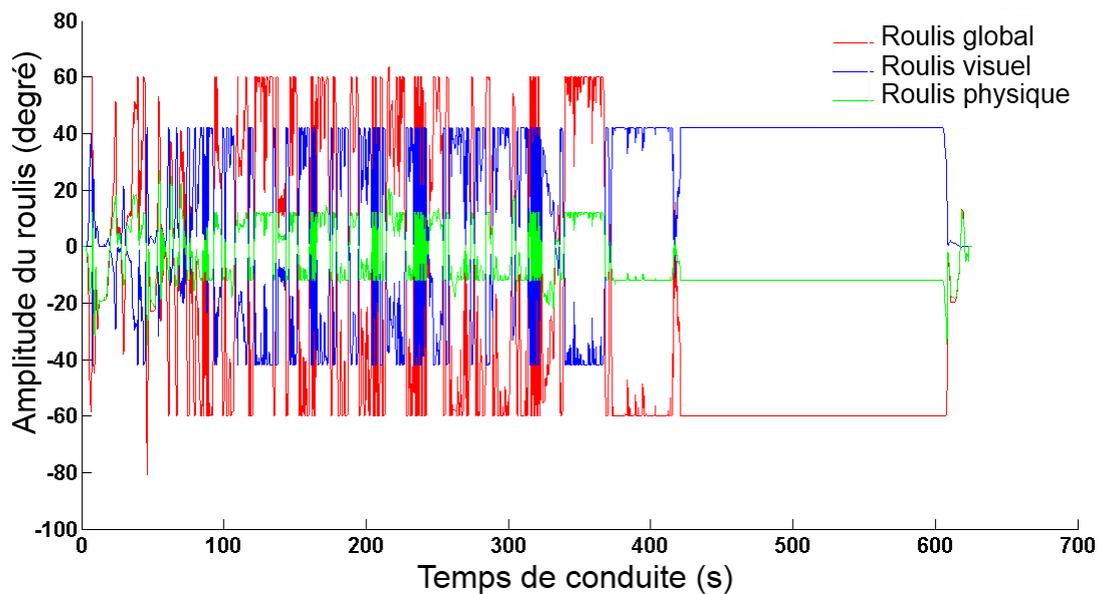


FIGURE 13.6 – Amplitude du roulis (visuel, physique et global) en fonction du temps de conduite, réalisée par le participant n°10 lors des dix premières minutes de conduite avec le modèle « physique ». Le roulis global correspond à la somme du roulis visuel (inclinaison de l'horizon visuel) et physique (inclinaison de la plate-forme mobile) ; le signe de l'amplitude de roulis est, par convention, positif lors d'une inclinaison de la plate-forme mobile vers le côté gauche et négatif lors d'une inclinaison de la plate-forme mobile vers le côté droit.

### 13.3.1 Contrôle de trajectoire

L'ANOVA à mesures répétées 2 modèles dynamiques de véhicule x 4 temps de conduite sur **la variabilité de la position latérale** a révélé un effet principal du temps de conduite,  $F(3, 54) = 12.30, p < .001, \eta^2 = .41$ , et du modèle dynamique de véhicule,  $F(1, 18) = 27.57, p < .001, \eta^2 = .61$  ainsi qu'une interaction entre ces deux facteurs,  $F(3, 54) = 10.37, p < .001, \eta^2 = .37$ . Pour la condition temps de conduite, les résultats ont montré que la variabilité de la position latérale était significativement plus élevée lors des cinq premières minutes de conduite ( $M = 7,19$  m,  $ET = 8,61$  m) comparées aux quinze minutes suivantes ( $M = 4,89, 3,61$  et  $3,57$  m et  $ET = 6,57, 5,48$  et  $6,39$  m, pour les temps de conduite 5-10, 10-15 et 15-20 min respectivement), qui ne se différencient pas significativement entre elles ( $p > .10$ ). Pour la condition modèle dynamique de véhicule, les résultats ont mis en évidence que la variabilité de la position latérale était plus importante lorsque la session de conduite était effectuée avec le modèle « fonctionnel F1 » ( $M = 10,70$  m,  $ET = 7,93$  m) par rapport au modèle « braquage » ( $M = 0,89$  m,  $ET = 0,26$  m).

Le test post-hoc sur l'effet d'interaction entre le modèle dynamique de véhicule et le temps de conduite a révélé que la variabilité de la position latérale était significativement plus importante pour le modèle « fonctionnel F1 » que pour le modèle « braquage », seulement pendant les cinq premières minutes de conduite. L'analyse a également mis en évidence, pour le modèle « fonctionnel F1 », une diminution graduelle de la variabilité de la position latérale pendant les quinze premières minutes de conduite (figure 13.7), mais celle-ci ne se différencie pas significativement entre 10-15 et 15-20 minutes de conduite. En revanche, pour le modèle « braquage », les résultats ont montré une absence de différence significative de la variabilité de la position latérale entre les différents temps de conduite.

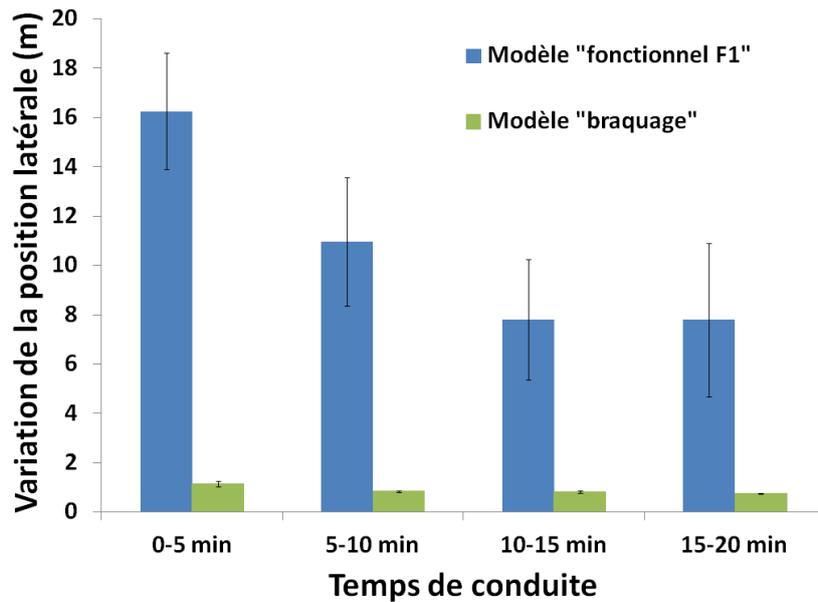


FIGURE 13.7 – Variabilité de la position latérale (en mètre) en fonction du temps de conduite et du modèle dynamique de véhicule conduit. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

L'ANOVA à mesures répétées 2 modèles dynamiques de véhicule x 4 temps de conduite sur le **nombre de sorties de route** n'a révélé aucun effet principal et d'interaction du modèle dynamique de véhicule et du temps de conduite, suggérant que le nombre de sortie de route ne différaient pas significativement entre les deux modèles et au cours du temps (figure 13.8).

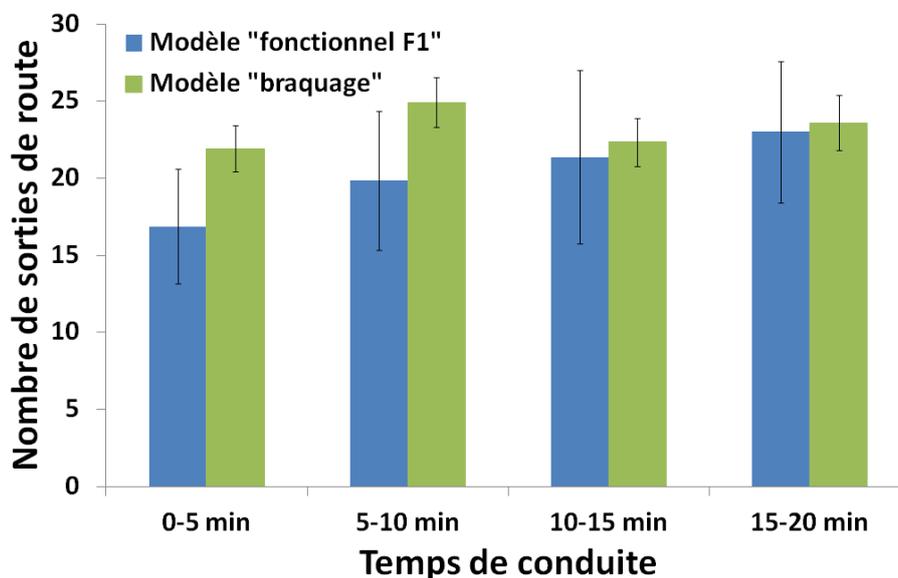


FIGURE 13.8 – Nombre de sorties de route en fonction du temps de conduite et du modèle dynamique de véhicule conduit. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

Enfin, l'ANOVA sur la **durée totale passée en dehors de la route** (en seconde) a révélé un effet principal du facteur modèle dynamique de véhicule,  $F(1, 18) = 27.14, p < .001, \eta^2 = .60$ . Le test post-hoc

sur l'effet du modèle dynamique de véhicule a indiqué que le temps passé au total en dehors de la route était moins important pour le modèle « braquage » ( $M = 96,26$  s,  $ET = 26,58$  s) que pour le modèle « fonctionnel F1 » ( $M = 206,89$  s,  $ET = 97,27$  s). L'analyse a également révélé que l'effet du temps de conduite approchait le seuil de significativité,  $F(3, 54) = 2.34, p = .08$ , suggérant que le temps passé en dehors de la route était plus important entre 5 et 10 minutes de conduite qu'entre 10 et 15 minutes de conduite ( $M = 153,59$  et  $119,96$  s,  $ET = 88,12$  et  $56,12$  s, pour, respectivement, les temps de conduite 5-10 et 10-15 minutes). Les données relatives à la durée totale passée hors de la route sont présentées dans la figure 13.9.

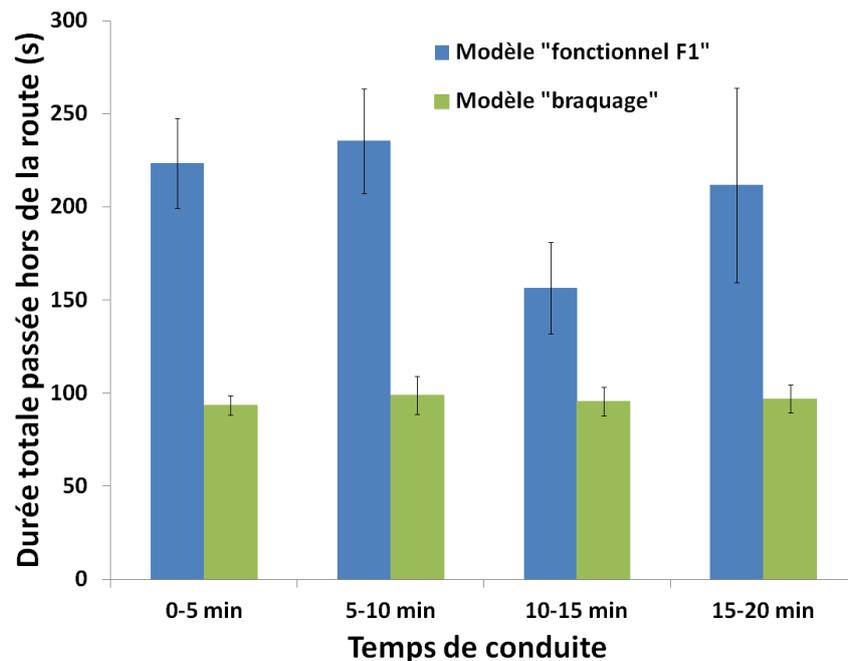


FIGURE 13.9 – Durée totale passée en dehors de la route (en seconde) en fonction du temps de conduite et du modèle dynamique de véhicule conduit. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

### 13.3.2 Charge mentale : caractérisation de l'effort fourni pour le contrôle de trajectoire au travers du SSR.

Deux méthodes différentes de mesure du SSR (*Steering Wheel Reversal Rate*) ont été principalement utilisées en simulation de conduite automobile. La première méthode [McLean et Hoffmann, 1975] utilise un point de référence fixe (position centrale à 0 degré) et consiste à calculer le nombre de fois que le volant change de côté par rapport à cette position fixe en dépassant un seuil prédéterminé, qui correspond à une mesure de l'angle de volant. Cette première méthode est essentiellement utilisée sur des routes en ligne droite. En revanche, la seconde méthode [Caro, 2008; Engström et al., 2005; Jamson et Merat, 2005] est une adaptation de la première méthode sur les routes sinueuses et, consiste à utiliser un point de référence mobile correspondant à la déviation maximale du volant depuis le dernier changement de sens. Le calcul du SRR réalisée dans cette présente étude repose sur la seconde méthode de calcul adaptée pour les routes sinueuses. La figure 13.10 présente les deux méthodes, classique et adaptée.

La détermination d'un seuil au-delà duquel le changement de sens du guidon sera pris en compte est

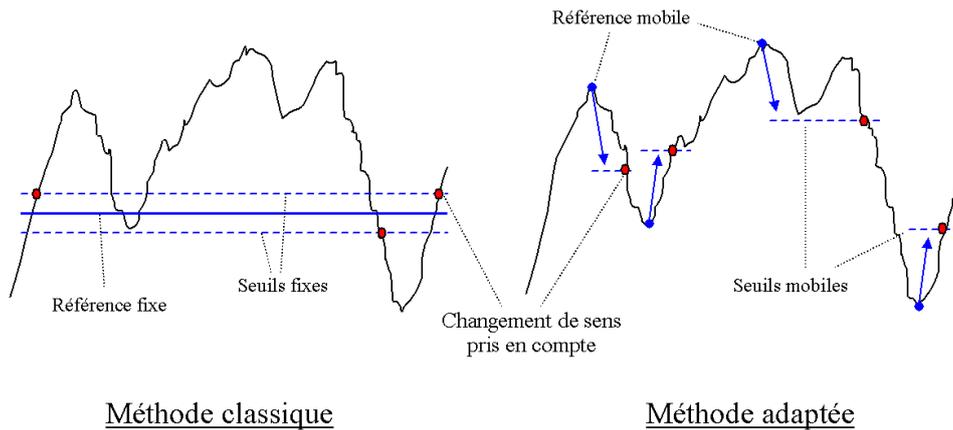


FIGURE 13.10 – Les deux méthodes de mesure du SRR. *Gauche* : La méthode classique utilisée sur route en lignes droites repose sur un point de référence fixe. *Droite* : La méthode adaptée qui est appliquée sur route sinueuse et s'appuie sur la recherche des extrema locaux par l'utilisation d'un point de référence mobile. Les courbes noires représentent la position du volant en fonction du temps. Extrait de [Caro, 2008].

nécessaire pour calculer le SRR. Ce seuil correspond à une mesure de l'angle du guidon. La figure 13.11 présente le SSR en fonction du seuil choisi pour chaque modèle dynamique de véhicule. L'ensemble des participants ( $n=36$ ) a été pris en compte pour déterminer ce seuil. Il est important de prendre en considération deux phénomènes avant de choisir le seuil. Tout d'abord, plus le seuil est faible ( $< 0,25$  degré) plus les valeurs du SRR sont élevées en raison principalement des micro-mouvements et du bruit de mesure. Il est ainsi préférable de choisir un seuil supérieur à  $0,25$  degré. De plus, plus le seuil choisi est élevé plus le nombre d'inversions prises en compte diminue. La mesure est alors de moins en moins fiable avec l'augmentation du seuil. Une valeur seuil de  $0,5$  degré semble satisfaire les contraintes ci-dessus et présente l'avantage d'être commune aux deux modèles dynamiques de véhicule.

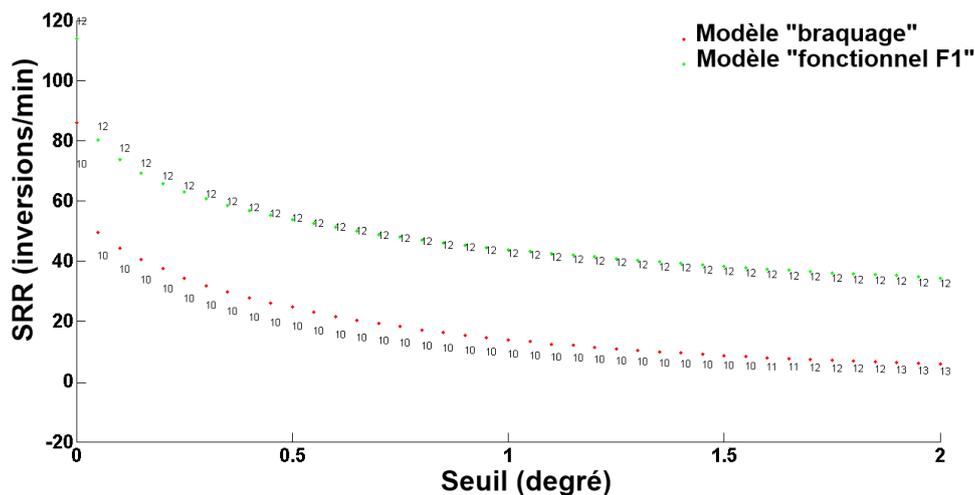


FIGURE 13.11 – SRR en fonction du seuil choisi pour les deux conditions de modèle dynamique de véhicule. Dans la situation où aucune inversion du sens du guidon n'est mesurée, les participants ne sont pas pris en compte. Dans ce cas, un nombre noir est placé à côté du point et indique le nombre de participants n'ayant pas été pris en compte.

Afin de déterminer l'influence du temps de conduite et du modèle de véhicule sur l'effort fourni pour le contrôle de trajectoire (SSR), une ANOVA à mesures répétées 2 modèles dynamiques de véhicule x 4 temps de conduite **sur le SRR** a révélé un effet principal du temps de conduite,  $F(3, 54) = 8.61, p < .001, \eta^2 = .32$ , et du modèle dynamique de véhicule,  $F(1, 18) = 10.77, p < .01, \eta^2 = .37$ , mais aucun effet d'interaction entre ces deux facteurs. Pour le temps de conduite, les résultats ont montré que plus le temps de conduite augmentait plus les valeurs du SRR diminuaient (figure 13.12), excepté entre les dix dernières minutes de conduite où les valeurs du SRR ne différaient pas significativement. Pour le modèle dynamique de véhicule, les résultats ont mis en évidence que le nombre d'inversion du sens du guidon par minute était plus faible pour le modèle « braquage » ( $M = 24,06$  inversions/min,  $ET = 15,05$  inversions/min) que pour le modèle « fonctionnel F1 » ( $M = 57,96$  inversions/min,  $ET = 37,64$  inversions/min).

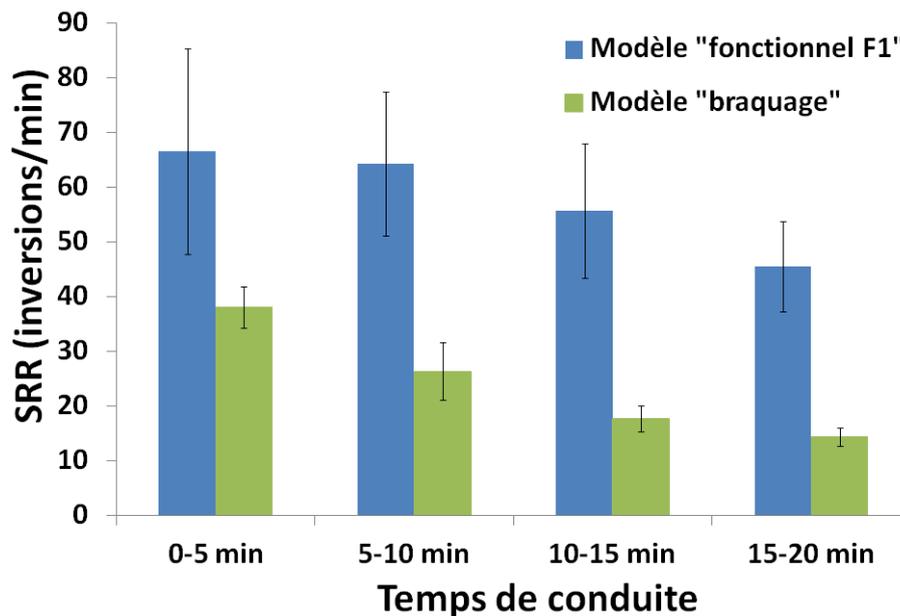


FIGURE 13.12 – SRR (inversions/min) en fonction du temps de conduite et du modèle dynamique de véhicule. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

### 13.3.3 Contrôle longitudinal

L'ANOVA à mesures répétées 2 modèles dynamiques de véhicule x 4 temps de conduite **sur la vitesse moyenne** a révélé un effet principal du temps de conduite,  $F(3, 54) = 13.74, p < .001, \eta^2 = .43$ , du modèle dynamique de véhicule,  $F(1, 18) = 18.93, p < .001, \eta^2 = .51$ , et d'interaction entre le modèle dynamique de véhicule et le temps de conduite,  $F(3, 54) = 5.05, p < .01, \eta^2 = .22$ . Pour le temps de conduite, les résultats ont montré une augmentation de la vitesse moyenne avec le temps de conduite. Plus précisément, la vitesse moyenne était significativement inférieure lors des cinq premières minutes de conduite par rapport aux temps de conduite supérieurs (figure 13.13). Pour le modèle dynamique de véhicule, les résultats ont indiqué que la vitesse moyenne était plus importante pour le modèle « braquage » ( $M = 92,98$  km.h<sup>-1</sup>,  $ET = 13,45$  km.h<sup>-1</sup>) que pour le modèle « fonctionnel F1 » ( $M = 45,68$  km.h<sup>-1</sup>,  $ET = 40,24$  km.h<sup>-1</sup>). L'interaction entre le modèle de véhicule et le temps de conduite a révélé que, pour le modèle « braquage », la vitesse moyenne ne différait pas avec l'augmentation du temps de conduite, alors que pour le modèle « fonctionnel F1 » la vitesse moyenne augmentait avec le temps de conduite excepté

entre 10-15 et 15-20 minutes de conduite. D'autre part, les résultats ont montré que la vitesse moyenne était significativement plus importante pour le modèle « braquage » que pour le modèle « fonctionnel F1 », seulement pendant les cinq premières minutes de conduite.

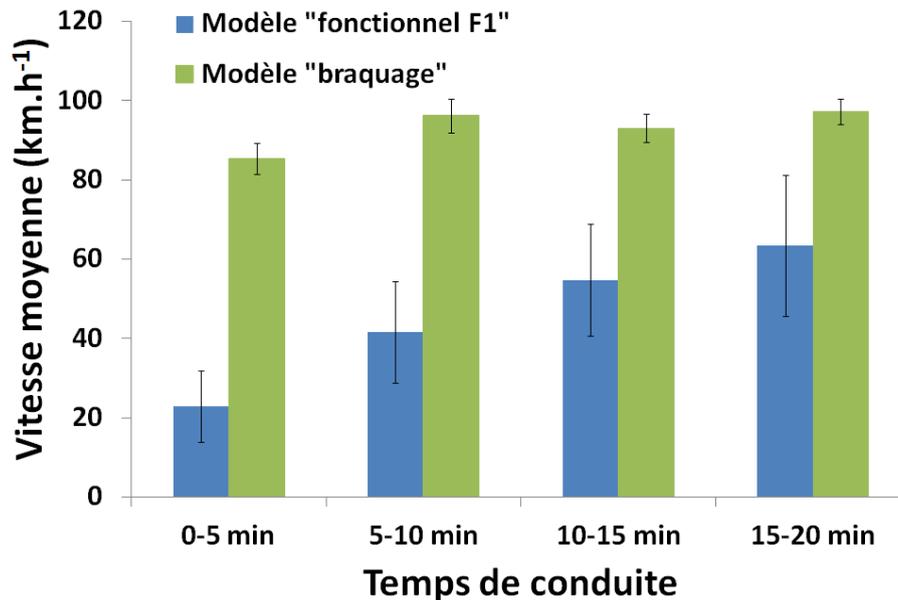


FIGURE 13.13 – Vitesse moyenne (en km.h<sup>-1</sup>) en fonction du temps de conduite et du modèle dynamique de véhicule conduit. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

Enfin, d'un point de vue descriptif, les résultats sur le **nombre d'arrêts effectués** (vitesse nulle) ont montré que les participants ont réalisé plus d'arrêts du véhicule pour le modèle « fonctionnel F1 » (M = 6,31 arrêts, ET = 10,56 arrêts) que pour le modèle « braquage » (où aucun arrêt n'a été effectué).

### 13.3.4 Durée de familiarisation

D'un point de vue descriptif, l'ensemble des 12 participants ayant conduit en premier le modèle « braquage » ont répondu s'être familiarisé avec le simulateur. En revanche, pour le modèle « fonctionnel F1 », seulement cinq sur les huit participants ont répondu avoir pris en main le simulateur.

Pour l'ensemble des participants ayant répondu s'être familiarisé avec le simulateur, nous avons comparé la durée de familiarisation subjective (déclarée par les conducteurs) à celle objective reposant sur l'évolution de la performance des participants au cours du temps de conduite afin de déterminer si le moment où les individus répondent se sentir familiarisé avec le dispositif correspond effectivement au moment où les individus ont pris objectivement en main le simulateur. La durée de familiarisation objective (ou temps objectif de prise en main) calculée correspond au temps où la variabilité de la position latérale sur la voie ainsi que le nombre d'inversion du sens du guidon par minute (SRR) atteignent un plateau.

Une ANOVA à mesures répétées 2 mesures (objective et subjective) x 2 modèles dynamique de véhicule (« fonctionnel F1 » et « braquage »; variable interindividuelle) sur la **durée de familiarisation** n'a pas révélé d'effet principal et d'interaction du facteur mesure. En revanche, l'ANOVA a révélé que l'effet principal du modèle de véhicule approchait le seuil de significativité,  $F(1, 15) = 3,31, p = .08$ , les participants se familiarisant plus rapidement avec le modèle « braquage » par rapport au modèle «

fonctionnel F1 ». La figure 13.14 présente les durées moyennes de familiarisation objective et subjective en fonction du modèle dynamique de véhicule conduit.

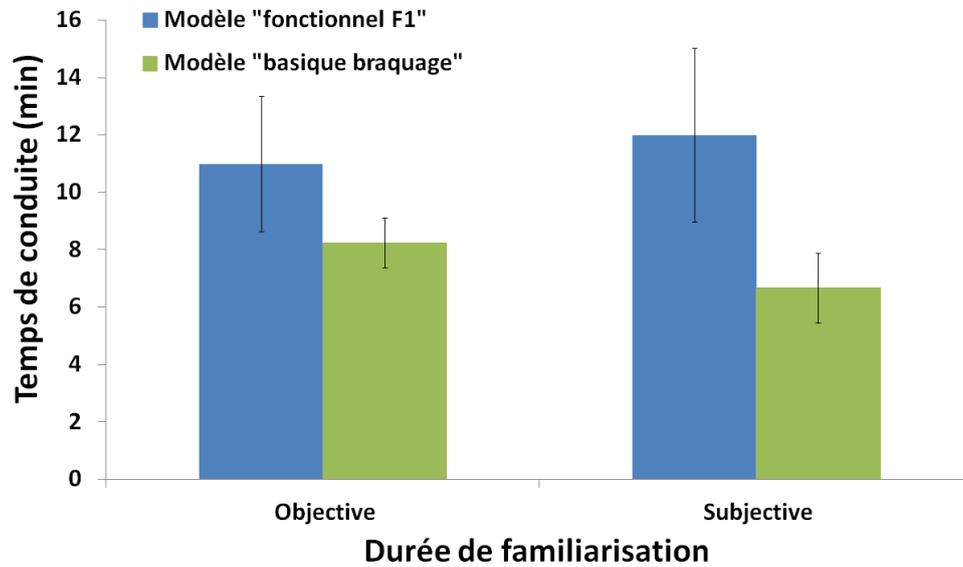


FIGURE 13.14 – Durée de familiarisation objective et subjective en fonction du modèle de véhicule conduit. La durée de familiarisation subjective correspond au temps écoulé entre le début de la conduite et la réponse des sujets. La durée de familiarisation objective correspond au temps de conduite où les indicateurs de contrôle de trajectoire (variabilité de la position latérale et SRR) atteignent un plateau. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard.

### 13.3.5 Sentiment de présence

Il existe deux méthodes de calcul du score total du sentiment de présence obtenu au questionnaire SUS (voir page 67, pour plus de détails sur ces deux méthodes). Nous avons utilisé, dans le cadre de cette étude, la méthode commune qui consiste à calculer la somme des réponses du participant aux six items [Nunez et Blake, 2003; Nunez, 2007].

Tout d'abord, d'un point de vue descriptif les scores de présence s'échelonnent de 7 à 35 points (le score maximal de l'échelle étant de 42 points). Le score total moyen de 21,5 points laisse apparaître des scores modérés de la présence ressentie par les motocyclistes en conduite sur le simulateur. Une ANOVA à une voie réalisée sur le score total de présence obtenu avec le questionnaire SUS en fonction du modèle de conduite n'a révélé aucun effet du modèle dynamique de véhicule. Pour chaque modèle dynamique de véhicule, les scores totaux moyens obtenus au questionnaire SUS sont présentés dans le tableau 13.1.

TABLE 13.1 – Scores totaux moyens obtenus au questionnaire Slater Usch et Steed (SUS) en fonction du modèle dynamique de véhicule.

Modèle dynamique de véhicule	Scores totaux au SUS	
	Moyenne	Ecart type
Modèle « fonctionnel F1 »	21,63	9,02
Modèle « Physique »	24,44	8,72
Modèle « braquage »	18,42	6,71

### 13.3.6 Positionnement de l'individu par rapport à l'environnement virtuel

Nous avons choisi pour cette étude de considérer ce questionnaire, non pas comme un questionnaire nous renseignant sur le sentiment de présence ressenti (évalué avec le questionnaire SUS), mais comme une source d'indication sur les facteurs de la présence qui sont évalués au travers de chacune des sous-échelles du questionnaire. Par conséquent, nous avons analysé les scores obtenus à chaque sous-échelle du questionnaire en fonction du modèle dynamique de véhicule. Sachant que l'environnement virtuel présenté aux motocyclistes ne permettait ni de voir son corps ni de toucher des objets, les items correspondants à la sous-échelle haptique n'ont pas été retenus dans les analyses statistiques. Les scores totaux de chaque sous-échelle diffèrent et s'échelonnent de 22 à 154 points<sup>4</sup>. Pour chaque sous-échelle (*i.e.*, réalisme, possibilité d'agir, qualité de l'interface, possibilité d'examiner, auto-évaluation de la performance et auditif), une ANOVA à une voie a été appliquée sur le score total. Les scores moyens obtenus aux six sous-échelles du PQ-F sont présentés en fonction du modèle dynamique de véhicule dans la figure 13.15.

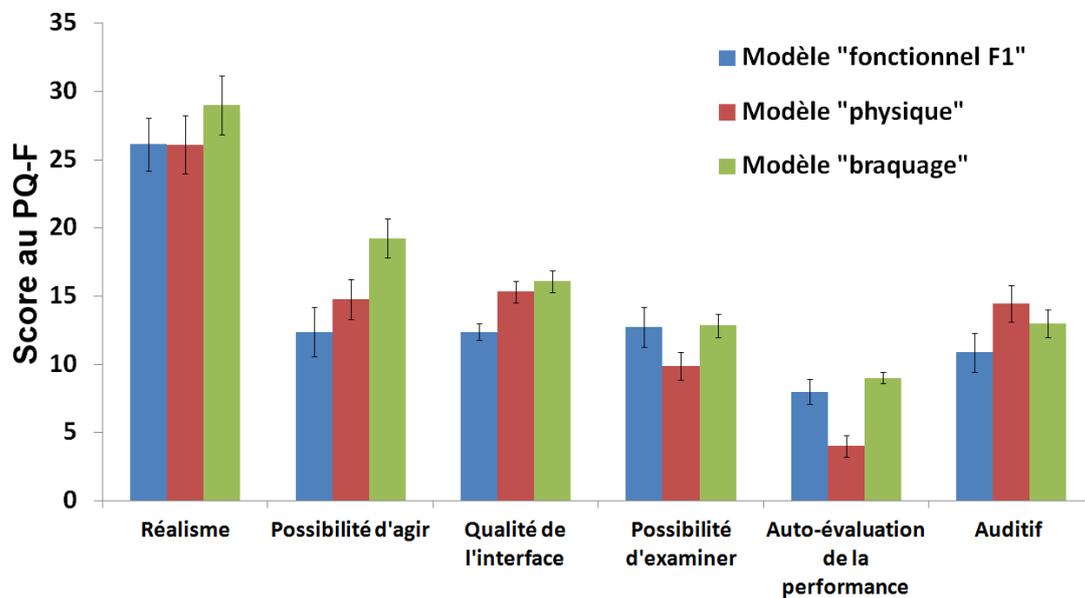


FIGURE 13.15 – Moyenne des scores obtenus aux six sous-échelles du questionnaire sur l'état de Présence (PQ-F) en fonction du modèle dynamique de véhicule. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

Les analyses n'ont révélé aucun effet du modèle dynamique de véhicule sur les scores obtenus aux sous-échelles *réalisme* ( $p > .10$ ), *possibilité d'examiner* ( $p > .10$ ) et *auditif* ( $p > .10$ ).

En revanche, pour la sous-échelle *possibilité d'agir*<sup>5</sup>, l'ANOVA a révélé un effet principal du modèle dynamique de véhicule,  $F(2, 26) = 5.21, p < .05, \eta^2 = .28$ . Les résultats ont montré que les participants ont rapporté des scores relatifs à leur possibilité d'agir dans l'environnement virtuel plus importants pour le modèle « braquage » ( $M = 19,25, ET = 5,01$ ) par rapport au modèle « fonctionnel F1 » ( $M = 12,38, ET = 5,15$ ) et au modèle « physique » ( $M = 14,78, ET = 4,32$ ). Aucune différence significative au niveau du score n'a été révélée entre le modèle « fonctionnel F1 » et « physique ».

4. Les scores maximaux sont respectivement de 49, 28, 21, 21, 14 et 21 points, pour les sous-échelles *réalisme*, *possibilité d'agir*, *qualité de l'interface*, *possibilité d'examiner*, *auto-évaluation de la performance* et *auditif*.

5. Voici un exemple de questions relatives à la sous-échelle *possibilité d'agir* : « Dans quelle mesure étiez-vous capable de contrôler les événements ? » ; à la sous-échelle *qualité de l'interface* : « Jusqu'à quel point avez-vous ressenti un délai séparant vos actions de leurs conséquences ? » ; et à la sous-échelle *auto-évaluation de la performance* : « En termes d'interactions et de déplacements dans l'environnement virtuel, jusqu'à quel point vous sentiez-vous compétent(e) à la fin de l'expérience ? ».

Pour la sous-échelle *qualité de l'interface*, l'ANOVA a révélé un effet principal du modèle de véhicule,  $F(2, 26) = 5.90, p < .01, \eta^2 = .32$ . Les résultats ont indiqué que, pour le modèle « fonctionnel F1 », les participants ont rapporté des scores plus faibles ( $M = 12,38, ET = 1,69$ ) par rapport aux modèles « braquage » ( $M = 16,08, ET = 2,81$ ) et « physique » ( $M = 15,33, ET = 2,40$ ), ces deux modèles ne se différenciant pas significativement.

Enfin, pour la sous-échelle *auto-évaluation de la performance*, l'effet principal du modèle dynamique de véhicule,  $F(2, 26) = 14.99, p < .001, \eta^2 = .53$ , reposait sur l'estimation de performances de conduite moins bonnes avec le modèle « physique » ( $M = 4, ET = 2,45$ ) qu'avec le modèle « braquage » ( $M = 9, ET = 1,48$ ) ou le modèle « fonctionnel F1 » ( $M = 8, ET = 2,56$ ). Aucune différence n'est apparue entre ces deux modèles.

### 13.3.7 Scores au SSQ

Le mal du simulateur a été évalué à l'arrivée des participants et après chaque session de conduite au moyen du SSQ. D'un point de vue descriptif, 29 sur les 36 participants (80 %) ont complété les 20 minutes de la première session de conduite et seules 21 personnes (58 %) ont réalisé les deux premières sessions de conduite en entier. Enfin, 17 participants uniquement (47 % des participants) ont réussi à effectuer l'ensemble des trois sessions de conduites, ceci signifiant que 53 % des participants ont dû arrêter prématurément l'expérience en raison des symptômes du mal du simulateur ressentis. Nous présentons uniquement les résultats des ANOVAs réalisées sur les participants qui ont complété entièrement la première session de conduite.

Afin d'investiguer l'effet *simulateur* sur le score total obtenu au questionnaire SSQ en fonction du modèle de véhicule conduit, une ANOVA a été réalisée selon le plan mixte 2 moments de passation (pré- et post-session) x 3 modèles dynamiques de véhicule. L'ANOVA a révélé un effet principal du moment de passation (effet simulateur),  $F(1, 26) = 9.89, p < .01, \eta^2 = .27$ , mais aucun effet principal et d'interaction du modèle dynamique de véhicule ( $p > .10$ ). Les résultats ont montré que les symptômes rapportés par les motocyclistes étaient plus importants après la première session de conduite qu'à leur arrivée au laboratoire (figure 13.16).

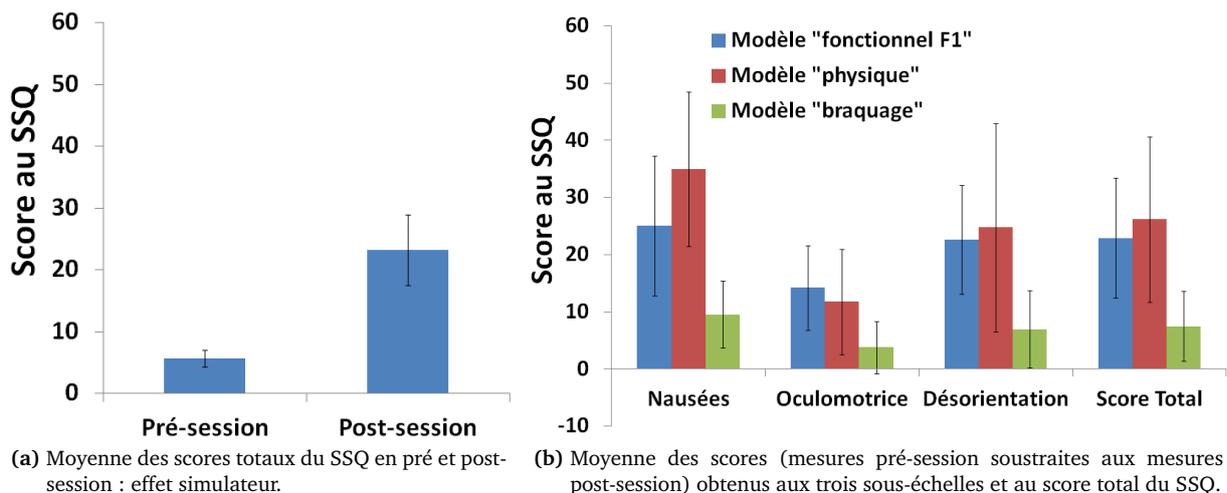


FIGURE 13.16 – Le mal du simulateur. Les scores maximaux sont de 200,34 pour la sous-échelle *nausée*, de 159,18 pour *l'oculomotricité*, de 292,32 pour la *désorientation* et de 235,62 pour le *score total* au questionnaire. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

### 13.3.8 Comparaison par classement des modèles dynamiques

Seuls 17 participants sur 36 ont réalisé les trois sessions de conduite dans leur totalité. Ces derniers ont établi à la fin de la dernière session de conduite un classement des trois modèles dynamiques de véhicule en fonction des critères de réalisme, de préférence personnelle et de facilité à conduire.

D'un point de vue descriptif, nous pouvons constater que, pour 58 % de ces participants le modèle « fonctionnel F1 » reproduisait l'expérience de conduite la plus réaliste. De plus, ce modèle de véhicule a été préféré par le plus grand nombre de participants (47 % des participants). Le modèle braquage a, quant à lui, été préféré par 41 % des participants et ce modèle a été jugé le plus facile à conduire par la majorité des participants (88 % des participants). En revanche, très peu (ou aucun) de participants ont considéré le modèle physique comme le plus réaliste, le plus facile à conduire ou encore comme leur préférence personnelle. Les résultats du classement sont présentés dans le tableau 13.2.

TABLE 13.2 – Résultats du classement des différents modèles dynamiques de véhicule en fonction des critères de réalisme, préférence personnelle et facilité à conduire. Pour chaque critère, est présenté dans le tableau le nombre de personne (sur 17 participants) ayant classé en première position chacun des modèles.

Modèles dynamiques de véhicule	Critères de classement		
	Réalisme	Préférence personnelle	Facilité à conduire
Modèle « fonctionnel F1 »	10	8	2
Modèle « braquage »	4	7	15
Modèle « Physique »	3	2	0

## 13.4 Discussion

La présente étude s'inscrit dans un processus de validation 'globale' du simulateur moto de l'IFSTTAR. L'objectif de cette étude était d'évaluer le degré de validité du simulateur, dans son état courant de développement, au travers de mesures objectives et subjectives en s'intéressant en particulier à l'évolution du comportement du conducteur au cours du temps (familiarisation) et à son ressenti (présence, mal du simulateur). De plus, comme il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus sur le modèle dynamique de véhicule à implémenter sur un simulateur moto, nous avons exploré le degré de validité du simulateur selon trois configurations possibles (modèle « physique », « fonctionnel F1 » et « braquage », les deux premiers ayant été développés au sein du LEPSiS, le troisième s'inspirant du simulateur Honda Rider Training). Tout d'abord, les résultats ont montré un effet robuste du temps de conduite aussi bien sur les indices de contrôle de trajectoire (variabilité de la position latérale et durée totale passée en dehors de la route) que sur les indicateurs de contrôle longitudinal du véhicule (vitesse moyenne), ainsi que sur la mesure de charge mentale (SRR). De même, un effet robuste du modèle dynamique de véhicule a été mis en évidence sur la majorité des mesures comportementales. D'autre part, alors qu'un effet du modèle dynamique de véhicule est apparue sur trois des six sous-échelles du questionnaire PQ-F, aucun effet n'a été mis en évidence sur le sentiment de présence (questionnaire SUS) et sur le mal du simulateur. Toutefois, les résultats ont montré que plus de la moitié des participants a été sensible au mal du simulateur. Ces résultats sont discutés séparément dans les sections suivantes.

## **Le mal du simulateur**

Cette étude a été à l'origine de mal du simulateur ; plus de la moitié des participants a souffert de ce syndrome et certains d'entre eux ont arrêté en cours d'expérience. Par conséquent, les résultats obtenus compromettent la validité du simulateur. Les résultats ont montré qu'au fur et à mesure de l'avancement dans les sessions de conduite, le nombre de participants souffrant de mal du simulateur augmentait. Tandis que 80 % des participants ont réalisé la première session de conduite dans sa totalité (soit 20 min), seuls 58 % des motocyclistes ont effectué les deux premières sessions de conduite en entier, et uniquement 47 % des participants ont réalisé l'ensemble des trois sessions de conduite.

Une première explication possible à cette augmentation du mal du simulateur au fur et à mesure des sessions de conduite est la durée totale de l'expérience. En effet, Stanney et al. [2002] ont mis en évidence que la durée d'exposition influençait l'intensité des symptômes déclarés au SSQ, avec une augmentation importante des symptômes pour des expositions de 45 et 60 minutes par rapport à une durée d'exposition de 15 minutes. Stanney et al. [2002] recommandent d'ailleurs un temps d'exposition entre 15 et 30 minutes pour permettre une adaptation des mouvements de l'utilisateur avec l'environnement virtuel tout en limitant l'apparition de symptômes liés au mal du simulateur. Bien que chaque session de conduite avait une durée fixe de 20 minutes, la durée totale d'exposition atteignait 60 minutes lorsque les trois sessions étaient réalisées. En parallèle, le fait que 20 % des participants aient souffert du mal du simulateur dès les vingt premières minutes de conduite peut s'expliquer par le large champ visuel (180 degrés) auquel les participants faisaient face. De nombreux auteurs ont mis en évidence que la taille du champ de vision constituait un facteur susceptible d'influencer le mal du simulateur, l'intensité des symptômes augmentant avec la largeur du champ de vision [DiZio et Lackner, 1997; Duh et al., 2002; Kolasinski, 1995; Lin et al., 2002]. Toutefois, l'origine de l'apparition du mal du simulateur peut également provenir du faible degré de contrôle des utilisateurs puisque nos résultats montrent que six sur les sept participants, qui n'ont pas réalisé la première session de conduite dans sa totalité, estimaient ne pas avoir encore le contrôle du simulateur. Il est, par ailleurs, reconnu dans la littérature que le degré de contrôle des utilisateurs constitue un facteur potentiel du mal du simulateur [Stanney et al., 2002].

En revanche, les résultats n'ont pas mis en évidence d'effet du modèle dynamique de véhicule sur le score au SSQ. On peut cependant constater que la totalité des participants ayant débuté par le modèle « braquage » ont réalisé la première session de conduite dans sa totalité alors que près d'un tiers des participants ayant commencé par le modèle « fonctionnel F1 » et le modèle « physique » ont arrêté au cours de la première session de conduite. Ce résultat montre que le modèle « braquage » semble générer moins de mal du simulateur que les deux autres modèles. Ce résultat peut s'expliquer par un meilleur degré de contrôle des utilisateurs en raison de l'utilisation, pour les changements de direction, d'actions de braquage au lieu de contre-braquage pour les deux autres modèles de véhicule, ou encore en raison de la configuration statique du simulateur (plate-forme immobile). En configuration statique, le simulateur implique peu de déséquilibre du conducteur et moins de mouvements parasites créés sur le guidon par rapport à une configuration dynamique du simulateur (utilisée pour les modèles « physique » et « fonctionnel F1 »).

## **Le sentiment de présence et les facteurs de présence.**

Concernant les facteurs de la présence (questionnaire PQ-F), les scores obtenus aux différentes sous-échelles étaient relativement modérés, laissant suggérer que l'ensemble de ces facteurs pouvaient être améliorés. De manière globale, la sous-échelle qualité de l'interface a obtenu le plus haut score (69 % du score maximal) suggérant ainsi que le simulateur fournissait un niveau acceptable de fidélité permettant

aux individus d'évoluer dans l'environnement virtuel. Toutefois, des améliorations sont possibles afin d'augmenter le sentiment de présence. Après la session de conduite, les participants ont déclaré que leur capacité à évaluer leur vitesse de passage était diminuée par le manque de qualité des informations sonores qui reproduisaient un bruit moteur de véhicule automobile et non de motocyclette. De plus, certains conducteurs ont également émis une critique importante sur la différence de texture entre la chaussée et les bas côtés qui n'étaient pas perceptible physiquement (par des vibrations au niveau du guidon et de la plate-forme mobile). En revanche, l'adaptation au dispositif n'a pas été perçue comme relativement facile par les participants puisque la sous-échelle auto-évaluation de la performance a été la moins bien évaluée (50 % du score maximal). Ces scores sont inférieurs à ceux rapportés par Tichon [2007] qui a indiqué des scores situés entre 70 et 80 % des scores maximaux, néanmoins leur étude était réalisée sur un simulateur de train et s'intéressait uniquement au contrôle longitudinal du véhicule. Des améliorations sont également possibles pour permettre une meilleure adaptation au dispositif. Les participants ont ainsi déclaré que le guidon était trop sensible et réactif à leur action entraînant ainsi une multitude de corrections de leur part et un contrôle de trajectoire difficile.

Les résultats ont également montré que les participants se sont positionnés différemment vis-à-vis de l'environnement virtuel en fonction du modèle dynamique de véhicule. En effet, les résultats ont mis en évidence que pour le modèle « braquage », les participants estimaient être capables de mieux contrôler, d'anticiper les événements et leur mouvement que les participants qui ont conduit les modèles « physique » et « fonctionnel F1 ». Ce résultat suggère que les participants ayant conduit le modèle « braquage » avaient plus de facilité à conduire et de meilleures performances de contrôle de trajectoire et longitudinal. De plus, les participants ayant conduit le modèle « physique » ont estimé avoir réalisé de moins bonnes performances (score moyen égal à 28 % du score maximal) comparé aux participants conduisant avec les deux autres modèles dynamiques de véhicule. Ce résultat suggère que les participants qui ont conduit avec le modèle « physique » se sont peu ou plus difficilement familiarisés avec le simulateur en comparaison aux autres participants. Ce résultat va dans le sens des données comportementales.

Le jugement des conducteurs sur le degré de présence ressenti dans l'environnement virtuel (questionnaire SUS) était également modéré. Toutefois, on a pu constater une variabilité interindividuelle importante, les scores allant de 7 à 35 points (le score maximal étant de 42 points). Il semble nécessaire de prendre en compte l'amélioration de certains paramètres pointés par les mesures des facteurs de présence (mesurés par le PQ-F) afin d'augmenter le sentiment de présence ressenti (mesuré par le SUS). Les résultats ont également montré que le degré de présence ressenti ne semblait pas dépendre du modèle dynamique de véhicule conduit. Ainsi, quelle que soit la configuration du simulateur, il semble que les participants n'aient pas eu la capacité d'adopter un comportement sensori-moteur similaire à celui qu'ils auraient adopté en situation réelle puisque nous supposons, sur la base de la littérature, que le degré de présence reflétait la capacité des individus à se comporter dans l'environnement virtuel comme en situation réelle de conduite. Toutefois, le mal du simulateur ressenti par les participants a pu diminuer le degré de présence ressenti par les participants et interférer sur leurs comportements de conduite. En effet, quelques études ont mis en évidence une relation négative entre le mal du simulateur et le degré de présence ressenti [Nichols et al., 2000; Stanney et al., 2002]. Enfin, le degré modéré de présence ressenti peut également être expliqué par un degré de contrôle modéré des conducteurs. De nombreuses études suggèrent en effet que plus l'utilisateur possède un niveau de contrôle important relatif à ses actions plus son sentiment de présence est élevé [Dinh et al., 1999; Slater et al., 1995b; Stanney et al., 2002; Welch et al., 1996; Witmer et Singer, 1998].

## Degré de contrôle de l'utilisateur en fonction du modèle dynamique de véhicule

Concernant le degré de contrôle des utilisateurs, les différentes mesures objectives ont indiqué une amélioration de la performance (variabilité de la position latérale, durée totale passée en dehors de la route, vitesse moyenne) au cours du temps. De plus, les résultats ont mis en évidence des différences de performances de conduite entre les trois configurations du simulateur. Les résultats ont montré que le degré de contrôle des utilisateurs était le plus faible pour le « modèle physique » puisque ces participants n'ont pas été capables de maîtriser l'inclinaison de la moto. Ces participants ont maintenu une inclinaison de la plate-forme mobile du simulateur sur le côté droit durant l'essentiel du temps de conduite. Les résultats ont également montré que le degré de contrôle des utilisateurs était plus faible pour le modèle « fonctionnel F1 » que pour le modèle « braquage ». En effet, les participants conduisant ce modèle ont passé plus de temps en dehors de la route et ont enregistré une variabilité de la position latérale significativement plus importante durant les cinq premières minutes de conduite, par rapport au modèle « braquage ». Toutefois, on a pu constater pour ce modèle que la variabilité de la position latérale diminuait graduellement pendant les quinze premières minutes de conduite contrairement au modèle « braquage ». Il semble ainsi que le degré de contrôle des utilisateurs pour le modèle « fonctionnel F1 » augmente avec le temps de conduite.

En sus des résultats sur la variabilité de la position latérale, cette étude a mis en évidence que la charge mentale allouée au contrôle de trajectoire était plus élevée pour le modèle « fonctionnel F1 » que pour le modèle « braquage ». Par conséquent, on peut suggérer que cette charge plus élevée soit due à un contrôle de trajectoire plus difficile. Les indicateurs utilisés pour analyser le contrôle longitudinal du véhicule vont également dans ce sens, *e.g.*, un nombre d'arrêts du véhicule (vitesse nulle) plus important pour le modèle « fonctionnel F1 » et une vitesse moyenne inférieure pour le modèle « fonctionnel F1 » par rapport au modèle « braquage ». Toutefois, les résultats ont révélé que la vitesse moyenne pratiquée avec le modèle « fonctionnel F1 » augmentait avec le temps de conduite, alors que celle-ci était stable au cours du temps avec le modèle « braquage ». Cette augmentation de la vitesse moyenne pour le modèle « fonctionnel F1 » peut être expliquée par un meilleur contrôle de trajectoire et à une diminution de la charge mentale au cours du temps. Cependant, les déclarations des participants en fin de session de conduite ne suggèrent pas une telle relation. En effet, les participants ont unanimement rapporté que, pour le modèle « fonctionnel F1 » uniquement, l'augmentation de leur vitesse moyenne de passage n'était pas due à un meilleur contrôle mais au contraire qu'elle en était la raison : elle leur permettait un meilleur contrôle du simulateur. Pour ce modèle « fonctionnel F1 », les participants ont ainsi déclaré que leur degré de contrôle était minime ou très difficile à faibles vitesses (inférieures à 30-40 km.h<sup>-1</sup>) pour la raison principale que le contrôle de la direction était assuré par une action de contre-braquage et non de braquage, et ont précisé que les actions de contre-braquages étaient naturelles seulement à plus hautes vitesses.

En parallèle, cette étude a montré que les douze participants ayant conduit le modèle « braquage » ont déclaré avoir pris en main le simulateur, alors que pour le modèle « fonctionnel F1 » uniquement cinq participants (sur huit) ont estimé avoir pris le contrôle du simulateur. En revanche, pour le modèle « physique », malgré une absence de contrôle de l'inclinaison du simulateur de l'ensemble des neuf participants, on peut toutefois noter que trois d'entre eux ont estimé s'être familiarisé avec le simulateur. Ces neuf participants, ayant conduit le modèle « physique », ont unanimement déclaré qu'ils pensaient que le simulateur était configuré de manière à rouler incliné sur le côté droit et qu'ils leur étaient impossible de revenir en position neutre quelle que soit l'action entreprise (action du le guidon, basculement du

corps du côté opposé). Les résultats de l'analyse appliquée uniquement sur les modèles « braquage » et « fonctionnel F1 » n'ont pas révélé de différence entre la durée de familiarisation déclarée par les participants et celle calculée à partir des données de contrôle de trajectoire. En revanche, l'effet du modèle de véhicule approchait le seuil de significativité, suggérant que les participants ayant conduit le modèle « braquage » s'étaient familiarisés plus tôt (au bout de 7 minutes en moyenne) au simulateur que les participants ayant conduit le modèle « fonctionnel F1 » (familiarisés en moyenne au bout de 11 min 30 s). Ce résultat est en accord avec les données de contrôle de trajectoire et longitudinal : les participants conduisant le modèle « braquage » ont un meilleur contrôle du simulateur que les participants conduisant le modèle « fonctionnel F1 » et arrivent par conséquent à contrôler plus tôt le simulateur. Ce résultat est très intéressant car il montre le temps nécessaire mis par des motocyclistes expérimentés à contrôler un simulateur moto sans indication préalable du mode de fonctionnement de ce dernier, ce qui est essentiel pour étudier le comportement du conducteur sans le modifier.

Toutefois, en raison d'un nombre conséquent de sorties de route et d'un temps passé en dehors de la route élevé, se pose la question de la prise en main effective du simulateur par les participants. En effet, pour le modèle « braquage », les participants passent en moyenne 32 % de leur temps en dehors de la route. Cette durée est encore supérieure pour le modèle « fonctionnel F1 » où les individus passent 69 % de leur temps en dehors de la route. On peut noter que cette durée passée en dehors de la route diminue cependant significativement entre les temps de conduite '5-10' minutes et '10-15' minutes. Comme dans notre étude, Stedmon et al. [2009] ont indiqué un temps moyen passé en dehors de la route plus important lorsque le contrôle de la direction s'effectuait par une action de contre-braquage par rapport à une action de braquage. Cependant, la durée passée en dehors de la route est supérieure à celle rapportée par Stedmon et ses collègues qui était par ailleurs plus restrictive en s'intéressant au temps passé en dehors de la voie. Stedmon et ses collaborateurs ont rapporté que les participants passaient entre 5 et 8 % de leur temps en dehors de la voie. Des différences de procédure expérimentale peuvent expliquer ces résultats divergents. En effet, leurs participants ont débuté par deux sessions d'entraînement (familiarisation) de 15 minutes. L'expérience proprement dite a ainsi débuté après 30 minutes de conduite alors que, pour notre étude, la session de conduite durait seulement 20 minutes sans période de familiarisation au préalable.

De plus, notre étude pose également la question de l'apprentissage de nouvelles coordinations sensori-motrices au travers de l'évaluation du comportement au cours du temps. En effet, nous avons pu noter, en particulier pour le modèle « fonctionnel F1 », une amélioration du comportement de conduite au cours du temps. Cette amélioration du comportement peut ainsi refléter l'adoption d'un comportement naturel des participants au moment où ces derniers ont augmenté leur vitesse de passage au-delà de 40 km.h<sup>-1</sup> (d'après leur déclaration). Toutefois, cette amélioration peut également traduire l'apprentissage de nouvelles coordinations sensori-motrices afin de satisfaire les exigences de contrôle du simulateur. Le degré de présence ressenti n'était pas assez sensible pour clarifier ce point. Il semble ainsi nécessaire, dans de futurs travaux, d'établir une comparaison entre la performance réalisée sur simulateur et celle obtenue sur une moto instrumentée afin de déterminer l'origine de l'amélioration du comportement des conducteurs pour ce modèle « fonctionnel F1 ».

Enfin, alors que le modèle « braquage » implique une durée de familiarisation plus courte et de façon générale un meilleur degré de contrôle, le classement établi par les participants a révélé que ceux-ci ont jugé ce modèle comme étant le plus facile à conduire. Cependant, ils ont préféré le modèle « fonctionnel F1 ». Les participants ont également estimé que le modèle « fonctionnel F1 » était le plus réaliste : le comportement de la moto avec ce modèle ressemblait le plus à une vraie moto. En revanche, le modèle «

physique » a été dans l'ensemble le modèle le moins bien noté. Ce résultat met en évidence que la validité physique n'est pas nécessaire pour produire une bonne illusion de conduite puisque le modèle « physique » reposant sur la dynamique d'une moto réelle n'a pas été perçu comme la configuration du simulateur produisant un comportement réaliste de la moto et une sensation de conduite réaliste. Contrairement à Stedmon et al. [2009], nos résultats montrent que la configuration la plus basique du simulateur (modèle « braquage ») n'obtient pas les scores de satisfaction les plus élevés mais reste, néanmoins, relativement plus apprécié que le modèle fondé sur la dynamique d'une moto réelle. Les participants ont déclaré, en fin de session de conduite du modèle « braquage », deux principaux reproches sur ce modèle qui sont les caractéristiques même de ce modèle : un contrôle de direction identique à celui d'une voiture (en braquage) et aucun mouvement physique du simulateur.

Pour conclure, cette étude a permis de montrer la place importante tenue par le modèle dynamique de véhicule au niveau de la simulation motocycliste. Il apparaît que le modèle « fonctionnel F1 » reposant sur des contraintes fonctionnelles établies par des motocyclistes experts a été le modèle le plus apprécié des participants. Toutefois, ces derniers ont éprouvé des difficultés de contrôle plus importantes avec ce modèle par rapport aux autres, en particulier lors des cinq premières minutes de conduite et aux vitesses basses. L'originalité de ce travail a résidé dans le fait de s'intéresser au comportement du conducteur dès les premières minutes de conduite et de découverte du simulateur alors que la majorité des études de la littérature réalise au préalable de leur expérience une session de familiarisation [Cossalter et al., 2010; Stedmon et al., 2009]. Les résultats ont mis en évidence que la validité du simulateur était compromise par l'apparition du mal du simulateur, par la durée de familiarisation élevée et également par l'amélioration du comportement du conducteur au cours du temps ; cette dernière pouvant refléter l'acquisition de nouvelles coordinations sensori-motrices nécessaires au contrôle du simulateur. De plus, il s'agit d'une des premières études à évaluer le degré de présence des individus et les facteurs de la présence afin de mieux cerner le positionnement du conducteur dans l'environnement virtuel et de caractériser l'adoption d'un comportement plus ou moins naturel du conducteur en réponse aux stimuli virtuels.

Finalement, ce travail constitue une première étape dans la démarche de validation du simulateur IFSTTAR et fournit une base déterminante pour développer le simulateur en utilisant une approche centrée utilisateur.

### **Amélioration du simulateur : Pistes envisagées**

L'ensemble des participants a émis différentes critiques vis-à-vis des trois modèles dynamiques de véhicule testés, ces critiques nous ont permis de dresser des points à améliorer sur le simulateur. Les principales pistes d'amélioration envisagées et conseillées sont présentées :

- (i) Poursuivre en priorité le développement du modèle « fonctionnel F1 » dont le comportement de la moto produit est perçu comme le plus naturel ;
- (ii) Pour le modèle « fonctionnel F1 », intégrer un mode de contrôle par des actions de braquage à basses vitesses ( $< 40 \text{ km.h}^{-1}$ ) et conserver les actions de contre-braquages jugées « naturelles » à plus hautes vitesses ( $> 40 \text{ km.h}^{-1}$ ) ;
- (iii) Réduire la sensibilité et la réactivité du guidon (pour l'ensemble des modèles dynamiques de véhicule) ;
- (iv) Reproduire un ressenti physique (vibrations et/ou difficulté de contrôle augmentée) en fonction des textures simulées visuellement (chaussée et bas côtés) ;

- (v) Améliorer le ressenti physique (résistance) lors du passage au point mort au niveau du sélecteur de vitesse ;
- (vi) Développer un système de restitution de vent ;
- (vii) Développer un meilleur retour sonore reproduisant un bruit moteur de moto et non de véhicule automobile.

# Chapitre 14

## Discussion générale et perspectives

Après un rappel du contexte applicatif de cette thèse, les principaux résultats obtenus seront critiqués, puis la pertinence de l'approche employée sera discutée. Enfin, les perspectives qu'offre ce travail seront abordées avec un regard appuyé sur la direction à prendre au niveau de la conception du simulateur en vue de son amélioration.

### 14.1 Discussion et critiques des principaux résultats

La validité des simulateurs est primordiale afin de s'assurer de la capacité de ces outils à mesurer l'objet d'étude tel que le comportement humain, sans le modifier ni le dégrader. Ce travail de thèse s'inscrivait dans ce contexte et avait pour objectif de mieux comprendre les facteurs améliorant la perception du mouvement propre et limitant la perception de la chute, principale limite sur les simulateurs de conduite motocycliste. De plus, ce travail avait également pour but d'enrichir les connaissances relatives aux méthodologies employées pour l'étude de la validité des simulateurs en opérant, par une démarche originale, aux premières étapes du processus de validation du simulateur moto.

Dans un premier temps, nous avons procédé au dimensionnement des caractéristiques immersives et interactives du simulateur, en s'appuyant sur une approche « élément par élément », afin de permettre au conducteur de ressentir une inclinaison crédible et acceptée sans toutefois percevoir une sensation de chute. Les analyses entreprises ont montré que la présence d'informations visuelles, en particulier périphériques, augmentait la sensibilité à la détection de l'inclinaison mais sans amplifier la sensibilité à la perception de la chute (angle de roulis seuil constant). De nombreuses études ont montré que la perception de la direction du mouvement, en particulier sur le mouvement de lacet, était influencée par la présence de sources lumineuses [Benson et Brown, 1989; Benson et al., 1989; Huang et Young, 1981; Stewart, 1970]. A partir de nos résultats, on peut suggérer que les informations visuelles périphériques permettent au conducteur une meilleure perception de son orientation (et de son véhicule virtuel) dans l'espace favorisant ainsi une meilleure cohérence entre les mouvements visuels et physiques produisant, en conséquence, une plus grande sensibilité à l'inclinaison sans accroître la sensibilité à la chute. Toutefois, ces résultats montrent que cette meilleure perception de l'orientation dans l'espace ne favorise pas la détection du mouvement, qui constitue vraisemblablement un phénomène purement dynamique sur simulateur moto, détecté principalement par les capteurs vestibulaires et proprioceptifs.

En sus de l'influence des informations visuelles, nous avons également étudié l'influence de la cinématique du mouvement (fréquence de la vitesse angulaire) et du côté d'inclinaison au travers de l'ensemble

des expériences dédiées au dimensionnement du simulateur. Conformément à nos hypothèses et aux données de la littérature, le côté d'inclinaison n'est pas apparu constituer un facteur d'influence des seuils de détection alors que l'ensemble des résultats a montré que la vitesse d'inclinaison influençait la rapidité de la détection du mouvement (comme une fonction puissance) et celle de l'inclinaison de soi. La vitesse d'inclinaison a également influencé la perception de la chute. En effet, les participants ont répondu selon différents patterns de réponse à la perception de la chute, ces derniers étant fonction de la vitesse d'inclinaison de la plate-forme mobile. L'origine de ces différents patterns de réponse a été investiguée en expérience 6. Les résultats ont montré que, globalement, les différentes variables explicatives envisagées (style perceptif, nombre de chute vécue, expertise de conduite, etc.) ne permettaient pas d'expliquer la différence de réponse à la chute. L'échantillon de la population étudiée étant limitée, de futures travaux doivent être menés afin d'identifier les déterminants du ressenti de la chute sur simulateur moto. De plus, malgré le caractère exploratoire de l'expérience 2, il est apparu que le positionnement de l'axe de rotation de roulis avait la capacité d'influencer le ressenti des conducteurs en diminuant leur sensibilité à la chute avec une position de l'axe proche de l'horizontal. Yamasaki et al. [1998] avaient déjà montré que le positionnement des centres de rotation influençait le ressenti des conducteurs durant une session de conduite ; notre étude complète et étend ces résultats à l'orientation de l'axe de rotation par rapport à un axe horizontal.

Par ailleurs, nous avons également étudié l'influence du couplage entre le roulis visuel (inclinaison de l'horizon visuel) et le roulis physique (inclinaison de la plate-forme mobile) sur la sensibilité des conducteurs aux mouvements de roulis. A cette fin, nous avons dans un premier temps cherché à identifier les différents paramètres permettant la production d'une sensation (illusion) d'inclinaison naturelle en roulis lors d'une prise de virage (études 3 et 5). Contrairement à nos hypothèses, trois couplages possibles entre le roulis visuel et physique ont été mis en évidence. Les résultats de ces deux expériences ont ainsi révélé à la fois un gain (rapport entre le roulis visuel et physique) différent et une utilisation différente de l'horizon visuel selon les participants. Une majorité des participants a privilégié une inclinaison de l'horizon visuel dans la direction opposée à celle du simulateur et une minorité de participants a choisi une inclinaison de l'horizon visuel dans la même direction que celle du simulateur ou aucune inclinaison de l'horizon visuel. Ces résultats sont particulièrement intéressants car ils rendent compte du choix des participants qui, bien que passifs dans la conduite, étaient actifs au niveau de l'ajustement de la direction et de l'amplitude de l'inclinaison de l'horizon visuel et de la plate-forme mobile. Il est intéressant de noter que l'ensemble des participants a mis en mouvement la plate-forme mobile montrant ainsi l'importance de l'ajout des informations inertielles et proprioceptives pour le ressenti de l'inclinaison en virage.

Les résultats concernant le couplage préférentiel identifié par les participants de ces deux études sont toutefois limités. D'une part, d'autres expériences sont nécessaires afin de déterminer plus précisément les raisons d'une utilisation différente de l'horizon visuel selon les participants. D'autre part, les motocyclistes étaient passifs au niveau de la conduite du simulateur, et ce afin d'éviter une prise en main difficile du simulateur qui aurait entravé et pu détériorer la tâche étudiée. En effet, contrôler la trajectoire du véhicule sur la route et ajuster, dans le même temps, l'amplitude et la direction des inclinaisons du roulis visuel et/ou physique aurait été particulièrement hasardeux et difficile si les participants n'arrivaient pas à maintenir un contrôle suffisant. De ce fait, les actions du conducteur sur le guidon ne pouvaient pas influencer l'amplitude du roulis visuel et physique, ce même si une relation entre ces paramètres (actions sur le guidon et restitution du roulis) est habituellement intégrée dans les modèles dynamiques de véhicule. Par conséquent, les résultats obtenus, en particulier au niveau du gain, sont susceptibles d'être modifiés lorsque l'amplitude des roulis visuel et physique dépend en partie des actions sur le guidon. En

raison de cette limite, nous avons dû faire face à une difficulté majeure que nous n'avons pu résoudre pour implémenter, dans les modèles dynamiques de véhicule développés par le laboratoire LEPSiS, les gains mis en évidence. De futures expériences sont nécessaires pour préciser les gains des couplages préférentiellement utilisés des participants entre les roulis visuel et physique durant une activité de conduite.

Sur la base de ces résultats, nous avons entrepris d'étudier l'influence de ces trois couplages possibles entre le roulis visuel et physique sur la sensibilité au mouvement de roulis. Les études entreprises ont montré des différences au niveau de l'inclinaison et de la chute ressentie. L'origine de ces différences n'a en revanche pu être identifiée. En effet, notre plan expérimental ne nous permettait pas d'isoler l'influence de l'inclinaison (et de sa direction) de l'horizon visuel de celle de la vitesse d'inclinaison du roulis physique, sur la sensibilité des conducteurs au roulis puisque nous manipulons les deux facteurs conjointement et utilisons des vitesses de roulis global (visuel + physique) identiques pour chacun des couplages mais des gains différents. Pour résoudre cette ambiguïté, une expérience complémentaire manipulant des vitesses de roulis physique similaires pour chacun des trois couplages est nécessaire. Toutefois, cette manipulation impliquera alors, à l'opposé, des vitesses différentes de roulis global et donc une stimulation différente pour chacun des couplages.

Au terme de ce travail de dimensionnement des caractéristiques immersives et interactives du simulateur, nous avons ainsi identifié une plage de mouvement pertinente à restituer afin que les conducteurs perçoivent une inclinaison sans ressentir de chute. De plus, nous avons également identifié les paramètres nécessaires pour produire une illusion d'inclinaison « réaliste » en termes de roulis global à restituer par rapport à l'inclinaison de moto réelle ainsi qu'en termes de partage de ce roulis global entre le roulis visuel et physique. Ces derniers résultats nécessitent cependant, comme nous l'avons suggéré précédemment, d'être confirmés lors d'une étude complémentaire impliquant des conducteurs en situation de conduite. Enfin, le phénomène de mal du simulateur, qui était étudié au cours de cette thèse comme un indicateur de la validité des simulateurs, a été mis en évidence lors de plusieurs de ces études. Toutefois, d'une manière générale, les symptômes déclarés par les participants étaient légers (excepté pour l'expérience de conduite) comparativement au score maximum possible au questionnaire utilisé. De plus, ces symptômes ont semblé apparaître principalement en raison de l'augmentation du champ visuel horizontal lors de l'utilisation du dispositif de restitution visuelle le plus récent (salle immersive composée de 3 écrans pour ce travail de thèse). En revanche, ce syndrome s'est manifesté avec un degré de sévérité beaucoup plus important lors de l'évaluation du simulateur dans sa globalité (expérience 7). Toutefois, conformément aux données de la littérature, ce résultat montre que la durée d'expérimentation, qui était plus longue que lors des expériences précédentes, semble jouer un rôle important dans l'apparition du mal du simulateur [Stanney et al., 1998a, 2002]. De plus, cette dernière étude impliquait pour les conducteurs de contrôler le simulateur puisque ces derniers étaient engagés dans une tâche de conduite. Le degré de contrôle des conducteurs apparaît, par ailleurs, dans la littérature constitué un facteur potentiel de ce syndrome [Kolasinski, 1995; Stanney et al., 2002].

Alors que la mise en évidence du phénomène du mal du simulateur met en cause la validité du simulateur, l'amélioration des performances de conduite au cours du temps et des durées de familiarisation au dispositif relativement longues posent également le problème de sa validité au travers de l'apprentissage potentiel de nouvelles coordinations sensori-motrices. L'évaluation du degré de présence ressenti censé refléter l'adoption d'un comportement naturel de l'utilisateur en réponse aux stimuli virtuels similaire au comportement adopté en situation réelle, n'est pas apparue assez sensible durant notre étude pour traduire l'émergence ou non d'un apprentissage et discriminer à ce niveau les différents modèles

dynamiques de véhicule à l'étude. Une mesure de la présence continue serait plus judicieuse afin d'étudier l'apparition d'éventuelles modifications comportementales au cours du temps comme au travers de mesures objectives de la présence. Les mesures physiologiques apparaissent être un indicateur adapté à l'activité de conduite en comparaison aux autres indicateurs de présence rapportés dans la littérature qui sont susceptibles d'interférer grandement avec la tâche de conduite (e.g., la mesure continue ; « *continuous measure assessment* », IJsselsteijn et al., 1998 ; mesure des *Break in Presence*, Brogni et al., 2003). Néanmoins, la méthode idéale afin de s'assurer du caractère naturel du comportement de conduite des participants constitue la comparaison à une situation réelle de référence mais celle-ci reste complexe et coûteuse à mettre en œuvre.

Enfin, cette thèse a également mis en évidence que la validité physique ne semble pas constituer une nécessité dans la production de la « bonne illusion » de conduite. Alors que la majorité des concepteurs de simulateurs moto développent des modèles dynamiques de véhicule reposant sur la dynamique d'une moto réelle, notre étude montre que le modèle fondé sur la dynamique d'une moto réelle (basée sur l'un des modèles de Cossalter, 2002) ne permet pas de répondre aux attentes des utilisateurs contrairement au modèle (fonctionnel F1) reposant sur la résolution d'une liste de contraintes fonctionnelles établie par des motocyclistes experts. En effet, ce modèle (fonctionnel F1) a été le plus apprécié et considéré comme le plus réaliste, bien que les motocyclistes aient unanimement déclaré que ce modèle était plus difficile à conduire aux basses vitesses. Ce modèle apparaît même être plus apprécié que le modèle reposant sur des actions de braquage (avec le simulateur en mode statique) alors que les données de la littérature rapportent que c'est généralement cette configuration, la plus basique, des simulateurs qui obtient les scores de satisfaction les plus élevés (e.g., Stedmon et al., 2009). Toutefois, conformément à la littérature, cette configuration basique constitue la configuration du simulateur la plus facile à conduire et celle produisant de meilleures performances de conduite sans induire de surcharge cognitive.

Au vu de l'ensemble de ces résultats et de leurs limites, l'analyse du comportement des motocyclistes sur le simulateur, dans son état actuel de développement, ne semble pas pouvoir être réalisée sans produire intrinsèquement une modification de ce comportement. Ce travail de thèse, constituant une première étape dans la démarche de validation du simulateur et reposant sur une approche centrée utilisateur, fournit au travers de ses résultats mais aussi de ses limites techniques et méthodologiques des pistes d'étude pour perfectionner le simulateur.

## 14.2 Pertinence de la méthodologie employée

La problématique de ce travail de thèse a été abordée selon deux approches d'évaluation du simulateur. La première consistait en une évaluation du simulateur par élément au cours de laquelle nous avons cherché à configurer au mieux les systèmes de restitution inertielle et visuelle au travers des tâches de perception de mouvement et d'ajustement du couplage optimal entre le roulis visuel et physique en condition passive. Cette première méthode d'évaluation nous a ainsi permis, entre autres, d'optimiser les différents systèmes de restitution et de valider une plage du mouvement de roulis pertinente à restituer pour produire une sensation d'inclinaison sans entraîner un déséquilibre critique allant jusqu'à la sensation de chute. La seconde méthode employée consistait en une évaluation du simulateur comme un tout, c'est-à-dire de manière globale, qui nous a permis d'évaluer le degré de contrôle des participants et de pointer les faiblesses actuelles du simulateur.

Alors que la majorité des études de validité utilise l'une ou l'autre des deux approches, nous préconisons une double évaluation des simulateurs, par élément et globale, qui présentent de nombreux avantages. Tout d'abord, une approche globale permet d'avoir un retour sur les différents éléments étudiés lors d'une approche par élément, avec un regard supplémentaire sur leur fonctionnement en interaction avec d'autres éléments de restitution. Ainsi, l'interaction entre les mouvements du guidon et l'inclinaison de la plate-forme mobile ou encore avec la trajectoire suivie visuellement a fait l'objet de retour critique de la part des participants. Le guidon a été diagnostiqué trop sensible et réactif entraînant trop rapidement un changement de trajectoire visuellement, et l'inclinaison de la plate-forme mobile a été jugée parfois trop brutale par rapport aux actions entreprises sur le guidon. Enfin, une évaluation par élément peut également servir une évaluation globale en intégrant les résultats obtenus lors de la première approche, même si, dans ce travail de thèse, l'intégration des résultats sur le roulis n'a pas été possible.

### **14.3 Pertinence du concept de présence pour évaluer les simulateurs de conduite**

Nous avons choisi d'utiliser un concept émergent dans la littérature, le concept de présence, pour évaluer le simulateur de conduite. La présence est un concept multidimensionnel dont les mesures pouvant être subjectives ou objectives permettent d'étudier le caractère pluriel des processus sollicités lors de simulation de conduite. En effet, l'évaluation des seules performances de la conduite, réalisée par la plupart des auteurs, masque d'importants phénomènes. Ceux-ci peuvent entacher la validité des simulateurs en altérant le comportement des conducteurs comme des symptômes de mal du simulateur, des stratégies fondées sur des artefacts (*e.g.*, les erreurs dans les bases visuelles 3D), un apprentissage du fonctionnement du simulateur durant la phase de familiarisation ou encore une surcharge cognitive.

Cependant, nos résultats sont mitigés. Bien que le questionnaire de présence n'ait révélé que des degrés de présence modérés en moyenne chez les participants, différentes améliorations au niveau des facteurs de présence ont été pointées par les analyses. Celles-ci ont fait ressortir que des améliorations sur plusieurs facteurs étaient possibles (*e.g.*, guidon trop sensible, manque d'indices sonores pertinents) pour augmenter la capacité des individus à adopter un comportement naturel similaire à celui adopté en situation réelle et, donc produire un plus fort degré de présence. L'étude de ces facteurs par le questionnaire sur l'Etat de Présence (PQ-F, Robillard et al., 2003) s'est ainsi avéré primordiale en vue d'optimiser ceux qui apportaient le moins de satisfaction aux participants et qui, par conséquent, diminuaient leur degré de présence.

Le questionnaire de présence utilisé, le questionnaire *Slater Usoh et Steed* [Slater et al., 1995a], s'est également révélé peu sensible pour discriminer les différentes configurations du simulateur. Toutefois, il s'agit d'une mesure post-exposition de la présence, et celle-ci ne permet donc pas préciser l'évolution du degré de présence au cours de la session de conduite entre les trois configurations de simulateur. Il se peut également qu'un effet de la présence ait été masqué en raison de la modification du plan expérimental initial pour réaliser les analyses et du nombre de participants par modèle de véhicule. Il serait néanmoins intéressant de compléter la mesure post-exposition par une mesure objective physiologique (*e.g.*, rythme cardiaque, ventilation ou de l'activité électrodermale) afin d'avoir un regard plus complet sur le degré de présence ressenti au cours de la conduite. Par ailleurs, afin de valider l'utilisation de ce concept pour évaluer les simulateurs, la comparaison à la fois de la performance et du degré de présence

ressenti entre environnement virtuel et réel est une nécessité.

Au vu de ces considérations, l'utilisation du concept de présence pour l'évaluation des simulateurs mérite d'être poursuivie en intégrant des mesures objectives de la présence et une comparaison à une situation réelle de référence.

## **14.4 Perspectives - Conception du simulateur : principales pistes de travail envisagées**

Suite aux résultats obtenus lors de ce travail de thèse, nous proposons plusieurs pistes d'amélioration du simulateur.

Tout d'abord, au vu des résultats obtenus, il nous semble important de limiter l'angle d'inclinaison de la plate-forme mobile à 11,4 degrés afin de limiter toute sensation de chute chez les conducteurs. Cette valeur seuil n'avait pas pu être intégrée au moment de la dernière étude pour des raisons de logistique. Toutefois, cette sensation de chute inévitable sur simulateur en raison de l'absence de force centrifuge et de la seule présence de la force gravitaire peut potentiellement être résolue par l'utilisation d'une centrifugeuse. En effet, le fait de placer le simulateur moto sur une plate-forme capable de tourner circulairement de manière à produire une accélération centrifuge permettrait de créer une illusion d'inclinaison dans le sens opposé à la direction de la rotation de la plate-forme en raison du vecteur gravito-inertiel, sans toutefois produire de sensation de chute puisque le simulateur ne s'inclinerait pas physiquement. Il nous paraît ainsi particulièrement intéressant de quantifier l'amplitude et le degré de réalisme de l'inclinaison perçue avec un tel dispositif et également de déterminer si ce dispositif permet effectivement d'éliminer toute perception de chute ou de déséquilibre. Toutefois, un tel dispositif serait très coûteux et pourrait être potentiellement nauséeux en raison d'une stimulation physique non naturelle et de l'utilisation de casque de réalité virtuelle qui sont souvent indiqués dans la littérature comme des dispositifs de restitution visuelle provoquant plus de symptômes de malaise que la projection sur écrans [Patrick et al., 2000; Sharples et al., 2008].

Nous avons également mentionné précédemment la difficulté d'intégrer les résultats de l'approche par élément aux modèles dynamiques de véhicule. Il paraît ainsi essentiel d'étudier ce couplage dans des conditions plus naturelles de conduite où toute action de l'utilisateur sur le guidon a une influence sur la trajectoire du véhicule mais aussi sur son inclinaison, ou tout du moins de vérifier, en conduite active, le couplage obtenu en conduite passive. Nous proposons, par exemple, de tester en conduite active un ensemble de couplages possibles (dont le couplage préférentiel obtenu en conduite passive) en évaluant à la fois la performance de conduite et le ressenti des conducteurs vis-à-vis de ces couplages.

Enfin, notre étude sur la contrôlabilité du simulateur a montré que le modèle « fonctionnel F1 » reposant sur des contraintes fonctionnelles établies par des motocyclistes experts a été le modèle le plus apprécié des participants et ce même si ces derniers ont éprouvé des difficultés de contrôle importantes aux faibles vitesses. Il paraît ainsi particulièrement intéressant de poursuivre en priorité le développement de ce modèle dont le comportement est perçu comme celui se rapprochant le plus d'une moto réelle. Dans ce but, il apparaît important d'intégrer un mode de contrôle plus intuitif à faibles vitesses (e.g., en braquage) tout en conservant un contrôle de la direction par des actions de contre-braquage à

plus hautes vitesses. De plus, certains participants de cette étude ont déclaré une trop grande sensibilité du guidon à leur action. Il serait ainsi intéressant d'étudier l'impact de différents degrés de sensibilité du guidon sur le ressenti des conducteurs ainsi que sur leur performance de conduite, notamment au niveau du contrôle de trajectoire.

Des faiblesses concernant certains éléments structurels du simulateur ont également été pointés par les participants tels que le ressenti physique (légère résistance) insuffisant lors du passage au point mort au niveau du sélecteur de vitesse, ou encore le manque de sensibilité au niveau du frein avant. De plus, il serait aussi nécessaire de reproduire par des stimuli haptique et proprioceptif les différences de textures de la scène visuelle afin d'améliorer l'immersion des conducteurs dans l'environnement virtuel et produire également un comportement plus naturel du simulateur lors des sorties de route. De même, alors que les informations sonores constituent un facteur de la présence [Larsson et al., 2005; Valjämäe, 2005] et un indicateur important de la vitesse pratiquée [Evans, 1970; Pinto, 2007], de nombreux participants ont émis des critiques du son produit par le système de restitution sonore. En effet, il est déterminant de développer un meilleur retour sonore reproduisant un bruit moteur de moto et non de véhicule automobile. Finalement, à partir d'un retour unanime des participants, il semble nécessaire de développer et d'intégrer dans la salle de simulation un dispositif de ventilation dont la puissance varierait avec la vitesse pratiquée des conducteurs. Un tel dispositif permettrait aux conducteurs d'obtenir une meilleure perception de leur vitesse pratiquée mais également de réduire la chaleur produite par le port du casque, qui peut être susceptible d'entraîner une sensation de malaise et une diminution du degré de présence.



## Annexe A

# Questionnaire de prédisposition au mal des transports (MSHQ)

1. Lorsque vous effectuez un trajet en bateau, vous arrive-t-il d'avoir mal au cœur ?
  - a) Je n'ai pas eu assez d'expérience en bateau pour savoir si je serais affecté(e)
  - b) Je suis très sensible au mal au cœur en bateau, au point de vomir
  - c) Parfois, je suis sensible au mal de mer mais pas au point de vomir
  - d) J'ai déjà eu mal au cœur en bateau lorsque j'étais plus jeune (au moins une fois), mais plus maintenant
  - e) Je n'ai jamais été affecté(e) par ce type de transport
2. Lorsque vous effectuez un trajet en voiture en position du passager, vous arrive-t-il d'avoir mal au cœur ?
  - a) Je n'ai pas eu assez d'expérience de trajet en voiture pour savoir si je serais affecté(e)
  - b) Je suis très sensible au mal au cœur en voiture ; je vomirais probablement si le trajet était long et sinueux
  - c) Parfois, je suis sensible au mal au cœur en voiture mais pas au point de vomir
  - d) J'ai déjà eu mal au cœur en voiture lorsque j'étais plus jeune (au moins une fois), mais plus maintenant
  - e) Je n'ai jamais été affecté(e) par ce type de transport
3. Lorsque vous effectuez un trajet en train, vous arrive-t-il d'avoir mal au cœur ?
  - a) Je n'ai pas eu assez d'expérience de voyage en train pour savoir si je serais affecté(e)
  - b) Je suis très sensible au mal au cœur en train ; je vomirais probablement si le trajet était long et sinueux
  - c) Parfois, je suis sensible au mal au cœur en train mais pas au point de vomir
  - d) J'ai déjà eu mal au cœur en train lorsque j'étais plus jeune (au moins une fois), mais plus maintenant
  - e) Je n'ai jamais été affecté(e) par ce type de transport
4. Lorsque vous effectuez un trajet en autocar, vous arrive-t-il d'avoir mal au cœur ?

- a) Je n'ai pas eu assez d'expérience de trajet en autocar pour savoir si je serais affecté(e)
  - b) Je suis très sensible au mal au cœur en autocar ; je vomirais probablement si le trajet était long et sinueux
  - c) Parfois, je suis sensible au mal au cœur en autocar mais pas au point de vomir
  - d) J'ai déjà eu mal au cœur en autocar lorsque j'étais plus jeune (au moins une fois), mais plus maintenant
  - e) Je n'ai jamais été affecté(e) par ce type de transport
5. Lorsque vous effectuez un trajet en métro, vous arrive-t-il d'avoir mal au cœur ?
- a) Je n'ai pas eu assez d'expérience de trajet en métro pour savoir si je serais affecté(e)
  - b) Je suis très sensible au mal au cœur en métro, au point de vomir parfois
  - c) Parfois, je suis sensible au mal au cœur en métro mais pas au point de vomir
  - d) J'ai déjà eu mal au cœur en métro lorsque j'étais plus jeune (au moins une fois), mais plus maintenant
  - e) Je n'ai jamais été affecté(e) par ce type de transport
6. Lorsque vous effectuez un trajet en avion, vous arrive-t-il d'avoir mal au cœur ?
- a) Je n'ai pas eu assez d'expérience de trajet en avion pour savoir si je serais affecté(e)
  - b) Je suis très sensible au mal au cœur en avion ; au point de vomir parfois
  - c) Parfois, je suis sensible au mal au cœur en avion mais pas au point de vomir
  - d) Je n'ai jamais été affecté(e) par ce type de transport
7. Lorsque vous prenez l'ascenseur, vous arrive-t-il d'avoir mal au cœur ?
- a) Je n'ai pas eu assez d'expérience pour savoir si je serais affecté(e)
  - b) Je suis très sensible au mal au cœur lorsque je prends l'ascenseur au point de vomir parfois
  - c) Parfois, je suis sensible au mal au cœur en ascenseur mais pas au point de vomir
  - d) Je n'ai jamais été affecté(e) par ce type de transport
8. Lorsque vous êtes en hamac, vous arrive-t-il d'avoir mal au cœur ?
- a) Je n'ai pas eu assez d'expérience pour savoir si je serais affecté(e)
  - b) Je suis très sensible au mal au cœur lorsque je m'allonge dans un hamac au point de vomir parfois
  - c) Parfois, je suis sensible au mal au cœur en hamac mais pas au point de vomir
  - d) Je n'ai jamais été affecté(e) par le hamac
9. Lorsque vous êtes dans un manège (grande roue, grand huit, chenille. . .) vous arrive-t-il d'avoir mal au cœur ?
- a) Je n'ai pas eu assez d'expérience pour savoir si je serais affecté(e)
  - b) Je suis très sensible au mal au cœur en manège au point de vomir parfois
  - c) Parfois, je suis sensible au mal au cœur en manège mais pas au point de vomir
  - d) Je n'ai jamais été affecté(e) par les manèges

## Annexe B

# Questionnaire du mal du simulateur (SSQ)

	RAS	Léger	Modéré	Sévère
Malaise général				
Fatigue				
Mal de tête				
Fatigue oculaire				
Difficulté d'accommodation				
Hyper salivation				
Sueur				
Nausée / vomissement				
Difficulté de concentration				
« Tête lourde »				
Vision floue				
Etourdissement Yeux Ouverts				
Etourdissement Yeux Fermés				
Vertige				
Réveil de la zone gastrique				
Eructation				



## Annexe C

# Questionnaire de Présence : Slater Usoh Steed Questionnaire (SUS)

1. Evaluer svp votre sentiment d'être «dedans», à l'intérieur de l'environnement virtuel généré par ordinateur sur l'échelle suivante de 1 à 7 :

<i>Dans l'environnement virtuel généré par ordinateur j'éprouvais le sentiment d'être « dedans » ...</i>	Cochez svp ci-contre votre réponse :
1. Pas du tout/ jamais	1
2. ...	2
3. ...	3
4. ...	4
5. ...	5
6. ...	6
7. Vraiment beaucoup/énormément	7

2. Pendant l'expérience, dans quelle mesure l'environnement virtuel généré par ordinateur devenait la « réalité » pour vous en oubliant presque le « monde réel » extérieur ? Répondez svp sur l'échelle suivante de 1 à 7.

<i>Pendant l'expérience, l'environnement « virtuel » généré par ordinateur devenait plus réel ou présent pour moi que le « monde réel » ...</i>	Cochez svp ci-contre votre réponse :
1. Jamais / A aucun moment	1
2. ...	2
3. ...	3
4. ...	4
5. ...	5
6. ...	6
7. Presque tout le temps	7

3. Quand vous vous remémorez l'expérience, représentez-vous l'environnement virtuel généré par ordinateur plus comme *quelque chose que vous avez vu (images)*, ou plus comme *quelque part où vous êtes allés (un endroit)* ? Répondez svp sur l'échelle suivante de 1 à 7.

<i>Le « monde virtuel » généré par ordinateur me semble être plus comme ...</i>	Cochez svp ci-contre votre réponse :
1. des images que j'ai vues	1
2. ...	2
3. ...	3
4. ...	4
5. ...	5
6. ...	6
7. Un endroit où je suis allé	7

4. De manière générale pendant l'expérience quel sentiment était pour vous le plus fort : votre sentiment d'être dans le « monde virtuel » ou celui d'être dans le « monde réel » (laboratoire) ?

<i>J'avais le fort sentiment d'être dans ...</i>	Cochez svp ci-contre votre réponse :
1. le monde réel (laboratoire)	1
2. ...	2
3. ...	3
4. ...	4
5. ...	5
6. ...	6
7. le monde virtuel présenté à l'écran	7

5. Lorsque vous vous remémorez votre expérience dans l'environnement virtuel. Dans quelle mesure le souvenir de cet «environnement virtuel» est-il semblable aux souvenirs d'autres endroits où vous êtes allés aujourd'hui ?

Considérez ici des éléments comme :

- dans quelle mesure vous avez un souvenir visuel de l'environnement,
- si ce souvenir est en couleur,
- dans quelle mesure le souvenir vous semble vif ou réaliste,...

<i>Je me remémore l'environnement virtuel d'une manière similaire aux autres endroits où je suis allé(e) aujourd'hui ...</i>	Cochez svp ci-contre votre réponse :
1. Pas du tout	1
2. ...	2
3. ...	3
4. ...	4
5. ...	5
6. ...	6
7. Vraiment beaucoup	7

6. Pendant l'expérience, aviez-vous le sentiment d'être réellement assis (sur un simulateur) dans une pièce face à des écrans ou le sentiment que l'environnement virtuel vous immergeait ?

<i>Pendant l'expérience, j'ai souvent pensé que j'étais vraiment assis dans la pièce face aux écrans ...</i>	Cochez svp ci-contre votre réponse :
1. La plupart du temps je réalisais que j'étais dans la pièce	1
2. ...	2
3. ...	3
4. ...	4
5. ...	5
6. ...	6
7. Jamais car le monde virtuel me submergeait	7



## Annexe D

# Questionnaire sur l'état de Présence (PQ-F)

Décrivez votre expérience dans l'environnement en marquant d'un "X" la case appropriée de l'échelle en 7 points, et ce en accord avec le contenu de la question et les étiquettes descriptives. Veuillez prendre en compte l'échelle en entier lorsque vous inscrivez vos réponses, surtout lorsque des niveaux intermédiaires sont en jeu. Répondez aux questions indépendamment les unes des autres et dans l'ordre dans lequel ils apparaissent. Ne sautez pas de questions et ne retournez pas à une question précédente afin de modifier votre réponse.

EN FONCTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LEQUEL VOUS ÉTIEZ

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

|\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_|  
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

2. Dans quelle mesure l'environnement était-il réactif (sensible) aux actions que vous y faisiez ?

|\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_|  
PAS MODÉRÉMENT COMPLÈTEMENT  
RÉACTIF RÉACTIF RÉACTIF

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

|\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_|  
EXTRÊMEMENT À MI-CHEMIN COMPLÈTEMENT  
ARTIFICIELLES NATURELLES

4. Dans quelle mesure les aspects visuels de l'environnement vous invitaient-ils à vous y impliquer ?

|\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_| |\_\_\_\_\_|  
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

5. Dans quelle mesure les mécanismes permettant votre mouvement dans l'environnement vous semblaient-ils naturels ?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|  
 EXTRÊMEMENT À MI-CHEMIN COMPLÈTEMENT  
 ARTIFICIELLES NATURELLES

6. Dans quelle mesure vos sens étaient-ils trompés par le réalisme du mouvement des objets à travers l'espace ?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|  
 PAS DU TOUT MODÉRÉMENT TRÈS  
 TROMPÉS TROMPÉS

7. Dans quelle mesure les expériences que vous avez vécues dans l'environnement virtuel ressemblaient-elles à celles de l'environnement réel ?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|  
 PAS MODÉRÉMENT TRÈS  
 RESSEMBLANT RESSEMBLANT RESSEMBLANT

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

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|  
 PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

9. Jusqu'à quel point étiez-vous en mesure d'explorer activement l'environnement de façon visuelle ?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|  
 PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

10. Jusqu'à quel point la sensation de déplacement à l'intérieur de l'environnement virtuel était-elle confondante (réaliste) ?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|  
 PAS MODÉRÉMENT TRÈS  
 CONFONDANTE CONFONDANTE CONFONDANTE

11. À quelle distance pouviez-vous examiner les objets ?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|  
 PAS PROCHE PLUTÔT TRÈS  
 DU TOUT PROCHE PROCHE

12. Jusqu'à quel point pouviez-vous examiner les objets sous différents angles ?

|-----|-----|-----|-----|-----|-----|  
 PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

13. Jusqu'à quel point étiez-vous impliqué(e) dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel ?



|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|  
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

21. Dans quelle mesure arriviez-vous à identifier correctement les sons produits dans l'environnement ?

|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|  
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

22. Dans quelle mesure arriviez-vous à localiser correctement les sons produits dans l'environnement ?

|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|  
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

23. Dans quelle mesure pouviez-vous explorer activement (et de façon tactile (par le toucher)) l'environnement ?

|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|  
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

24. Jusqu'à quel point pouviez-vous déplacer (ou manipuler les objets) dans l'environnement virtuel ?

|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|\_\_\_\_\_|  
PAS DU TOUT ASSEZ COMPLÈTEMENT

## Annexe E

# Questionnaire sur la propension à l'immersion (ITQ-F)

Indiquer votre réponse en inscrivant un "X" dans la case appropriée de l'échelle en 7 points. Veuillez prendre en compte l'échelle en entier lorsque vous inscrivez vos réponses, surtout lorsque des niveaux intermédiaires sont en jeu. Par exemple, si votre réponse est "une fois ou deux", la deuxième case à partir de la gauche devrait être utilisée. Si votre réponse est "plusieurs fois mais pas extrêmement souvent", alors la sixième case (ou la deuxième à partir de la droite) devrait être utilisée.

1. Devenez-vous facilement et profondément absorbé(e) lorsque vous visionnez des films ou des téléromans ?

JAMAIS			À L'OCCASION			SOUVENT

2. Vous arrive-t-il d'être tellement absorbé(e) dans une émission de télévision ou un livre que les gens autour de vous ont de la difficulté à vous en tirer ?

JAMAIS			À L'OCCASION			SOUVENT

3. Jusqu'à quel point vous sentez-vous mentalement éveillé(e) ou vif(ve) d'esprit en ce moment même ?

PAS ÉVEILLÉ(E)			MODÉRÉMENT			COMPLÈTEMENT ÉVEILLÉ(E)

4. Vous arrive-t-il d'être tellement absorbé(e) dans un film que vous n'êtes pas conscient(e) des choses qui se passent autour de vous ?

JAMAIS			À L'OCCASION			SOUVENT

5. À quelle fréquence vous arrive-t-il de vous identifier intimement avec les personnages d'une histoire ?

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT

6. Vous arrive-t-il d'être tellement absorbé(e) dans un jeu vidéo que vous avez l'impression d'être à l'intérieur du jeu plutôt qu'en train de manoeuvrer des manettes de jeu et de regarder un écran ?

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT

7. Comment vous sentez-vous au plan de la forme physique aujourd'hui ?

PAS EN FORME | | | MODÉRÉMENT BIEN | | | EXTRÊMEMENT BIEN

8. Dans quelle mesure êtes-vous efficace pour vous couper des distractions extérieures lorsque vous êtes en train de faire quelque chose ?

PAS TRÈS BON(NE) | | | PLUTÔT BON(NE) | | | TRÈS BON(NE)

9. Lorsque vous assistez à un match sportif, vous arrive-t-il de devenir tellement pris(e) par le match que vous réagissez comme si vous étiez un des joueurs ?

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT

10. Vous arrive-t-il d'être tellement absorbé(e) dans des rêveries, en plein jour, que vous n'êtes pas conscient des choses qui se passent autour de vous ?

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT

11. Vous arrive-t-il d'avoir des rêves qui semblent tellement réels que vous vous sentez désorienté(e) au réveil ?

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT

12. Quand vous faites du sport, vous arrive-t-il d'être à ce point absorbé(e) que vous perdez la notion du temps ?

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT

13. Dans quelle mesure arrivez-vous à vous concentrer lors d'activités plaisantes ?

PAS DU TOUT | | | MODÉRÉMENT BIEN | | | TRÈS BIEN

14. À quelle fréquence jouez-vous à des jeux vidéos ? (SOUVENT devrait correspondre à tous les jours, ou tous les deux jours, en moyenne)

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT

15. Vous est-il déjà arrivé(e) d'être excité(e) lorsque vous visionnez une scène de poursuite ou de combat à la télévision ou dans un film ?

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT

16. Vous est-il déjà arrivé(e) d'être apeuré(e) par quelque chose se produisant à la télévision ou dans un film ?

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT

17. Vous est-il déjà arrivé(e) de demeurer apeuré(e) longtemps après le visionnement d'un film d'épouvante ?

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT

18. Vous arrive-t-il de devenir absorbé(e) à un point tel dans une activité donnée que vous en perdez la notion du temps ?

JAMAIS | | | À L'OCCASION | | | SOUVENT



## Annexe F

# Liste des contraintes comportementales à satisfaire [Caro, 2011]

Le modèle « fonctionnel F1 » repose sur une liste de contraintes fonctionnelles établies par des motocyclistes experts. Cette liste est présentée ci-dessous.

- 1) Pour déclencher un virage à gauche (resp. à droite) à vitesse moyenne ou haute, je pousse sur le guidon du côté gauche (resp. droite).
- 2) Pour déclencher un virage à basse vitesse, j'appuie sur le corps de la moto (réservoir, repose pieds, selle...) de façon à l'incliner du côté où je veux aller.
- 3) Le passage du comportement (1) au comportement (2) se fait de façon progressive.
- 4) Quelle que soit la vitesse, je peux maintenir l'inclinaison de ma moto et conserver mon rayon de courbure en poussant sur le guidon du côté de l'inclinaison (e.g., je pousse à gauche pour maintenir une inclinaison à gauche).
- 5) A basse vitesse, je peux aussi maintenir l'inclinaison en maintenant mon appui sur le corps de la moto (point 2).
- 6) Pour redresser ma moto en sortie de virage et reprendre une trajectoire rectiligne, je peux soit accélérer soit réduire l'effort que j'exerce sur le guidon.
- 7) Ma moto est stable : elle se redresse naturellement lorsque je relâche les commandes et reprend ainsi une trajectoire rectiligne (sauf à très basse vitesse, où je risque de tomber).
- 8) L'inclinaison de ma moto, la vitesse à laquelle je roule, et la trajectoire que j'emprunte sont liées de façon à ce que la gravité et la force centrifuge se compensent.
- 9) En cours de virage, le guidon est tournée du côté du virage ; l'angle guidon étant lié au rayon de courbure.
- 10) Plus ma vitesse est élevée et plus je fais de petits mouvements de guidon (car j'adapte ma vitesse au rayon de courbure).
- 11) Plus ma vitesse est élevée et plus le guidon semble « raide » : il est plus difficile de le tourner.
- 12) A l'arrêt ou à très basse vitesse, je ressens les frottements pneu-chaussée lorsque je tourne le guidon.
- 13) A l'arrêt, je dois prendre appui sur le sol avec les pieds pour maintenir ma moto verticale, sinon elle tombe.
- 14) Lorsque j'accélère ou je freine, je ressens un mouvement de tangage.



# Bibliographie

- ADAMS, W. J. et MAMASSIAN, P. (2004). Bayesian combination of ambiguous shape cues. *Journal of vision*, 4(10):921–929.
- ALAIS, D. et BURR, D. (2004). The ventriloquist effect results from near-optimal bimodal integration. *Current biology*, 14(3):257–262.
- ALLISON, R., HARRIS, L., JENKIN, M., JASIOBEDZKA, U. et ZACHER, J. (2001). Tolerance of temporal delay in virtual environments. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality (VR'01)*, pages 247–254. IEEE Comput. Soc.
- ALLISON, R. S., HOWARD, I. P. et ZACHER, J. E. (1999). Effect of field size, head motion, and rotational velocity on roll vection and illusory self-tilt in a tumbling room. *Perception*, 28(3):299–306.
- ALM, H. (1995). Driving simulators as research tools – effects of kinesthetic feedback on driver behaviour. Part of DRIVE project V2065 GEM, Generic Evaluation Methodology for Integrated Driver. Rapport technique.
- AMANS, B. et MOUTREUIL, M. (2005). Projet RIDER (Recherche sur les accidents Impliquant un Deux Roues motorisé). Rapport final, n°RIDER200503-10. Rapport technique, Centre Européen d'Etudes de Sécurité et d'Analyse des Risques de Nanterre (CEESAR), Fondation Maif.
- ANDERSEN, R. a., SNYDER, L. H., BRADLEY, D. C. et XING, J. (1997). Multimodal representation of space in the posterior parietal cortex and its use in planning movements. *Annual Review of Neuroscience*, 20:303–30.
- ANDERSON, K. C. et SIEGEL, R. M. (1999). Optic flow selectivity in the anterior superior temporal polysensory area , STPa , of the behaving monkey. *The Journal of Neuroscience*, 19(7):2681–2692.
- ANGELAKI, D., GU, Y. et DEANGELIS, G. C. (2009). Multisensory integration : psychophysics, neurophysiology, and computation. *Current opinion in neurobiology*, 19(4):452–458.
- AUPETIT, S. (2010). *Étude ergonomique de l'apprentissage de la conduite moto dans une perspective de prévention*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- BAÑOS, R. M., BOTELLA, C., ALCAÑIZ, M., LIAÑO, V., GUERRERO, B. et REY, B. (2004). Immersion and emotion : their impact on the sense of presence. *CyberPsychology & Behavior*, 7(6):734–741.
- BAÑOS, R. M., BOTELLA, C., RUBIÓ, I., QUERO, S., GARCÍA-PALACIOS, A. et ALCAÑIZ, M. (2008). Presence and emotions in virtual environments : the influence of stereoscopy. *CyberPsychology & Behavior*, 11(1):1–8.

- BANGAY, S. et PRESTON, L. (1998). An investigation into factors influencing immersion in interactive virtual environments. In RIVA, G., WIEDERHOLD, B. et MOLINARI, E., éditeurs : *Virtual environments in clinical psychology and neuroscience*, pages 43–51. Ios Press., Amsterdam.
- BANTON, T., STEFANUCCI, J., DURGIN, F., FASS, A. et PROFFITT, D. (2005). The perception of walking speed in a virtual environment. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 14(4):394–406.
- BARBAGLI, F., FERRAZZIN, D., AVIZZANO, C. A. et BERGAMASCO, M. (2001). Washout filter design for a motorcycle simulator. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality (VR'01)*, pages 225–232.
- BARNETT-COWAN, M. et HARRIS, L. R. (2009). Perceived timing of vestibular stimulation relative to touch, light and sound. *Experimental Brain Research.*, 198(2-3):221–231.
- BASTIANELLI, A. et VIDOTTO, G. (2007). Improving selective attention with riding simulator. *Perception, ECVF Abstract Supplement*, 36.
- BAUMGARTNER, T., VALKO, L., ESSLEN, M. et JÄNCKE, L. (2006). Neural correlate of spatial presence in an arousing and noninteractive virtual reality : an EEG and psychophysiology study. *CyberPsychology & Behavior*, 9(1):30–45.
- BAURÈS, R., BENGUIGUI, N., AMORIM, M.-A. et HECHT, H. (2009). Intercepting real and simulated falling objects : what is the difference ? *Journal of Neuroscience Methods*, 184(1):48–53.
- BEAR, M. F., CONNORS, B. W. et PARADISO, M. A. (2006). *Neuroscience : exploring the brain*. Lippincott édition.
- BEAUCHAMP, M. S., YASAR, N. E., KISHAN, N. et RO, T. (2007). Human MST but not MT responds to tactile stimulation. *Journal of Neuroscience*, 27(31):8261–8267.
- BÉDARD, M. B., PARKKARI, M., WEAVER, B., RIENDEAU, J. et DAHLQUIST, M. (2010). Assessment of driving performance using a simulator protocol : validity and reproducibility. *The American Journal of Occupational Therapy*, 64(2):336–340.
- BELLA, F. (2008). Driving simulator for speed research on two-lane rural roads. *Accident Analysis and Prevention*, 40(3):1078–1087.
- BELMONTE, J.-P. (2001). Le contrebraquage en conduite motocycliste. Rapport technique, Fondation Promocycle.
- BENSON, A. (1982). The vestibular sensory system. In BARLOW, H. et MOLLON, J., éditeurs : *The Senses*, pages 333–368. Cambridge University Press, New York, NY.
- BENSON, A. et BROWN, S. (1989). Visual display lowers detection threshold of angular, but not linear, whole-body motion stimuli. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 60(7):629–633.
- BENSON, A., HUTT, E. et BROWN, S. (1989). Thresholds for the perception of whole body angular movement about a vertical axis. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 60(3):205–213.
- BERGER, D. R. (2009). Scene scaling during simulated forward accelerations : Are explicit size cues used ? Rapport technique, Max Planck Institute for Biological Cybernetics.
- BERGER, D. R., SCHULTE-PELKUM, J. et HEINRICH, H. B. (2007). Simulating believable forward accelerations on a Stewart motion platform. Rapport technique 159, Max Planck Institute for Biological Cybernetics.

- BERTHELON, C., MESTRE, D., POTTIER, A. et PONS, R. (1998). Is visual anticipation of collision during self-motion related to perceptual style? *Acta Psychologica*, 98(1):1–16.
- BERTHOZ, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob.
- BIOCCA, F. (1997). The cyborg's dilemma : embodiment in virtual environments. **In** TOMS, S. A. et WEIL, R. J., éditeurs : *Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Technology Humanizing the Information Age*, volume 3 de *Methods in Molecular Biology*, pages 12–26. IEEE Comput. Soc.
- BIOCCA, F. (2003). Can we resolve the book, the physical reality, and the dream state problems? From the two-pole to a three-pole model of shifts in presence. *East*, 7(6).
- BISCHOF, N. (1974). Optic-vestibular orientation to the vertical. **In** KORNBUHER, H., éditeur : *Handbook of Sensory Physiology*, pages 155–190. Springer-Verlag, New York.
- BISDORFF, A. R., WOLSLEY, C. J., ANASTASOPOULOS, D., BRONSTEIN, A. M. et GRETTY, M. A. (1996). The perception of body vertically (subjective postural vertical) in peripheral and central vestibular disorders. *Brain*, 119:1523–1534.
- BLAAUW, G. (1982). Driving experience and task demands in simulator and instrumented car : a validation study. *Human Factors*, 24(4):473–486.
- BLAKE, E., CASANUEVA, J. et NUNEZ, D. (2000). Presence as a means for understanding user behaviour in virtual environments. *South African Computer Journal*, 26:247–252.
- BLANA, E. (1996). Driving simulator validation studies : A literature review. Rapport technique, Institute of Transport Studies, University of Leeds.
- BOTELLA, C. (1998). Virtual reality treatment of claustrophobia : a case report. *Behaviour Research and Therapy*, 36(2):239–246.
- BOUGARD, C. (2009). *Comportement des conducteurs de deux-roues motorisés : influences de la privation de sommeil et de l'heure de la journée sur les performances de conduite réelle et simulée*. Thèse de doctorat, Université de Caen, Basse Normandie.
- BOUVIER, P. (2008). The five pillars of presence : guidelines to reach presence. **In** SPAGNOLLI, A. et GAMBERINI, L., éditeurs : *Proceedings of Presence 2008 : the 11th Annual International Workshop on Presence*, pages 246–249, Padoue, Italie.
- BOUVIER, P. (2009). *La présence en réalité virtuelle : une approche centrée utilisateur*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- BOYCOTT, B. B. et WÄSSLE, H. (1991). Morphological classification of bipolar cells of the primate retina. *European Journal of Neuroscience*, 3:1069–1088.
- BRANDT, T., DICHGANS, J. et KOENIG, E. (1973). Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Experimental Brain Research*, 16(5):476–491.
- BREMMER, F., DUHAMEL, J., HAMED, S. et GRAF, W. (2000). Stages of self-motion processing in primate posterior parietal cortex. *International Review of Neurobiology*, 44:173–198.
- BREMMER, F., KLAM, F., DUHAMEL, J.-R., BEN HAMED, S. et GRAF, W. (2002). Visual-vestibular interactive responses in the macaque ventral intraparietal area (VIP). *European Journal of Neuroscience*, 16(8): 1569–1586.

- BRINGOUX, L., MARIN, L., NOUGIER, V., BARRAUD, P. et RAPHEL, C. (2000). Effects of gymnastics expertise on the perception of body orientation in the pitch dimension. *Journal of Vestibular Research*, 10:251–258.
- BRINGOUX, L., NOUGIER, V., BARRAUD, P.-A., MARIN, L. et RAPHEL, C. (2003). Contribution of somesthetic information to the perception of body orientation in the pitch dimension. *The Quarterly journal of experimental psychology. A, Human experimental psychology*, 56(5):909–923.
- BRINGOUX, L., SCHMERBER, S., NOUGIER, V., DUMAS, G., ALAIN, P. et RAPHEL, C. (2002). Perception of slow pitch and roll body tilts in bilateral labyrinthine-defective subjects. *Neuropsychologia*, 40:367–372.
- BRITTEN, K. (2008). Mechanisms of self-motion perception. *Annual Review of Neuroscience*, 31:389–410.
- BROGNI, A., SLATER, M. et STEED, A. (2003). More breaks less presence. **In** *Proceedings of Presence 2003 : The 6th Annual International Workshop on Presence*, Aalborg, Danemark.
- BRONSTEIN, A. M. (1999). The interaction of otolith and proprioceptive information in the perception of verticality : the effects of labyrinthine and CNS disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 871:324–333.
- BRÜNGER-KOCH, M. (2005). Motion parameter tuning and evaluation for the dlr automotive simulator. **In** *Proceedings of Driving Simulation Conference of North America (DSC-NA'05)*, Orlando, FL.
- BRÜNGER-KOCH, M., BRIEST, S. et VOLLRATH, M. (2006). Do you feel the difference ? A motion assessment study. **In** *Proceedings of Driving Simulation Conference Asia/Pacific*, Tsukuba, Japon.
- BURKHARDT, J., BARDY, B. et LOURDEAUX, D. (2003). Immersion, Réalisme et Présence dans la conception et l'évaluation des Environnements Virtuels = Immersion, realism and presence in the design and evaluation of Virtual Environments. *Psychologie Française*, 48(2):35–42.
- BUSER, P. et IMBERT, M. (1982). *Psychophysiologie sensorielle : neurophysiologie fonctionnelle II*. Hermann, Paris.
- BUTLER, J. S., SMITH, S. T., CAMPOS, J. L. et BÜLTHOFF, H. H. (2010). Bayesian integration of visual and vestibular signals for heading. *Journal of Vision*, 10(11):1–13.
- BYSTROM, K.-E., BARFIELD, W. et HENDRIX, C. (1999). A conceptual model of the sense of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2):241–244.
- CARO, S. (2008). *Perception et contrôle de la distance intervéhiculaire en condition de brouillard : Etude sur simulateur*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble 2.
- CARO, S. (2011). *Simulateur moto : description du modèle fonctionnel*. Rapport technique, IFSTTAR, LEPSiS, Paris, France.
- CASALI, J. et FRANK, L. (1986). Perceptual distortion and its consequences in vehicular simulation : basic theory and incidence of simulator sickness. *Transportation Research Record*, 1059:57–65.
- CHATZIASTOS, A., WALLIS, G. M. et BÜLTHOFF, H. H. (1999). The effet of field of view and surface texture on driver steering performance. **In** GALE, A., BROWN, I., HASLEGRAVE, C. et TAYLOR, S., éditeurs : *Vision in Vehicles*, chapitre VII, pages 253–259. Elsevier.

- CHIYODA, S., YOSHIMOTO, K. et KAWASAKI, D. (2000). Development of a motorcycle simulator using parallel manipulator and head mounted display. *In Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'00)*, Paris, France.
- CHIYODA, S., YOSHIMOTO, K., KAWASAKI, D., MURAKAMI, Y. et SUGIMOTO, T. (2002). Development of a motorcycle simulation using parallel manipulator and head mounted display. *In Proceedings of the 6th International Conference on Motion and Vibration Control*, pages 599–602, Saitama, Japan.
- CLARK, B. (1967). Threshold for the perception of angular acceleration in man. *Aerospace Medicine*, 38(5):443–450.
- CLARK, B. et STEWART, J. D. (1970). Thresholds for the perception of angular acceleration about the three major body axes. *Acta Oto-laryngologica*, 69(1-6):231–238.
- COELHO, C., TICHON, J., HINE, T. J., WALLIS, G. et RIVA, G. (2006). Media presence and inner presence : the sense of presence in virtual reality technologies. *In RIVA, G., ANGUERA, M., WIEDERHOLD, B. et MANTOVANI, F., éditeurs : From Communication to Presence : Cognition, Emotions and Culture towards the Ultimate Communicative Experience.*, pages 25–45. IOS Press, Amsterdam, Pays-Bas.
- COLIN, J. et LIENHART, H. (1999). Orientation spatiale et équilibration. *In COLIN, J., éditeur : Médecine Aérospatiale*, pages 211–224. Expansion Scientifique Publications, Paris.
- COLOMBET, F. (2010). *Facteur d'échelle visuelle pour la restitution de la perception de vitesse en simulation de conduite automobile*. Thèse de doctorat, Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers.
- COLOMBET, F., DAGDELEN, M., REYMOND, G., PERE, C., MERIENNE, F. et KEMENY, A. (2008). Motion cueing : what is the impact on the driver's behavior ? *In Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'08)*, Monaco, France.
- COSSALTER, V. (2002). *Motorcycle dynamics*. Race Dynamics, Greendale, WI.
- COSSALTER, V., DORIA, A. et LOT, R. (1999). Steady turning of two-wheeled vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 31(3):157–181.
- COSSALTER, V., DORIA, A. et LOT, R. (2004). Development and validation of a motorcycle riding simulator. *In FISITA World Automotive Congress*, Barcelona, Espagne.
- COSSALTER, V., LOT, R., MASSARO, M. et 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.
- COSSALTER, V., LOT, R. et ROTA, S. (2010). Objective and subjective evaluation of an advanced motorcycle riding simulator. *In SCHWAB, A. et MEIJAARD, J., éditeurs : Proceedings of the Bicycle and Motorcycle Dynamics Symposium*, pages 20–22, Delft, Pays-bas.
- CURRY, R., ARTZ, B., CATHEY, L., GRANT, P. et GREENBERG, J. (2002). Kennedy SSQ results : fixed- vs. motion-based Ford simulators. *In Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'02)*, pages 289–300, Paris, France.
- DACEY, D. et LEE, B. (1994). The 'blue-on' opponent pathway in primate retina originates from a distinct bistratified ganglion cell type. *Nature*, 367:731.

- DAGDELEN, M., REYMOND, G., KEMENY, A., BORDIER, M. et MAZI, N. (2004). Mpc based motion cueing algorithm : development and application to the Ultimate driving simulator. *In Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'04)*, Paris, France.
- DAVIS, B. T. et GREEN, P. (1995). Benefits of sound fro driving simulation : an experimental evaluation. Rapport technique, University of Michigan, Transportation Research Institute.
- DE VRIJER, M., MEDENDORP, W. P. et VAN GISBERGEN, J. a. M. (2008). Shared computational mechanism for tilt compensation accounts for biased verticality percepts in motion and pattern vision. *Journal of Neurophysiology*, 99(2):915–930.
- DE VRIJER, M., MEDENDORP, W. P. et VAN GISBERGEN, J. A. M. (2009). Accuracy-precision trade-off in visual orientation constancy. *Journal of vision*, 9(2):9.1–15.
- de WINTER, J., de GROOT, S., MULDER, M. et WIERINGA, P. (2007). The fun of engineering : a motion seat in a driving simulator. *In Proceedings of Driving Simulation Conference of North America (DSC-NA'07)*, Iowa City, IA.
- de WINTER, J. C. F., de GROOT, S., MULDER, M., WIERINGA, P. A., DANKELMAN, J. et MULDER, J. A. (2009). Relationships between driving simulator performance and driving test results. *Ergonomics*, 52(2):137–153.
- DI STASI, L. L., Álvarez VALBUENA, V., CAÑAS, J. J., MALDONADO, A., CATENA, A., ANTOLÍ, A. et 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(5):361–370.
- DILLON, C., KEOGH, E., FREEMAN, J. et DAVIDOFF, J. (2001). Presence : is your heart in it ? *In Proceedings of Presence 2001 : 4th International Workshop on Presence*, Temple, PA.
- DINH, H. Q., WALKER, N., SONG, C., KOBAYASHI, A. et HODGES, L. F. (1999). Evaluating the importance of multi-sensory input on memory and the sense of presence in virtual environments. *In Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR'99)*, pages 222–228, Houston, TX.
- DIZIO, P. et LACKNER, J. (1997). Circumventing side effects of immersive virtual environments. *In SMITH, M. et SALVENDY, R., éditeurs : Design of Computing System : Social and Ergonomic Considerations*, pages 893–896. Elsevier, Amsterdam.
- DRAPER, J. V., KABER, D. B. et USHER, J. M. (1998). Telepresence. *Human Factors*, 40(3):354–375.
- DUFFY, C. J. (2000). Optic flow analysis for self-movement perception. *International Review of NeuroBiology*, 44:199–218.
- DUFFY, C. J. et WURTZ, R. (1996). Optic flow, posture, and the dorsal visual pathway. *In ONO, T., MCNAUGHTON, B., MOLOTCHNIKOFF, S., ROLLS, E. et NISHIJO, H., éditeurs : Perception Memory and Emotion : Frontier in Neuroscience*, pages 63–77. Elsevier Science, Cambridge.
- DUFFY, J. et WURTZ, R. H. (1991). Sensitivity of MST neurons to optic flow stimuli. I. A Continuum of response selectivity to large-field stimuli. *Journal of Neurophysiology*, 65(6):1329–1345.
- DUH, H. B.-L., LIN, J. J. W., KENYON, R. V., PARKER, D. E. et FURNESS, T. A. (2002). Effects of characteristics of image quality in an immersive environment. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 11(3):324–332.

- DYDE, R. T., JENKIN, M. R., JENKIN, H. L., ZACHER, J. E. et HARRIS, L. R. (2009). The effect of altered gravity states on the perception of orientation. *Experimental Brain Research.*, 194(4):647–660.
- ELLIS, S. (1991). Nature and origin of virtual environments : a bibliographic essay. *Computing Systems in Engineering*, 2(4):321–347.
- ELLOUMI, H. (2006). *Commande des plates-formes avancées de simulation de conduite*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- ENGSTRÖM, J., JOHANSSON, E. et ÖSTLUND, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2): 97–120.
- ERIKSSON, L. et von HOFSTEN, C. (2005). Effects of visual flow display of flight maneuvers on perceived spatial orientation. *Human Factors*, 47(2):378–393.
- ERNST, M. O. (2006). A Bayesian view on multimodal cue integration. **In** KNOBLICH, G., THORNTON, I., GROSJEAN, M. et SHIFFRAN, M., éditeurs : *Human body perception from the inside out*, volume 131, chapitre 6, pages 105–131. Oxford University Press, New York, NY.
- ERNST, M. O. (2007). Learning to integrate arbitrary signals from vision and touch. *Journal of Vision*, 7(5):1–14.
- ERNST, M. O. et BANKS, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870):429–433.
- ERNST, M. O. et BÜLTHOFF, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4):162–169.
- ESPIÉ, S. (1999). Vehicle-driven simulator versus traffic-driven simulator : the INRETS approach. **In** *Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'99)*, pages 367–376, Paris, France.
- EVANS, L. (1970). Speed estimation from a moving automobile. *Ergonomics*, 13(2):219–230.
- FERRAZZIN, D. et BARBAGLI, F. (2000). MORIS : simplified dynamic model. Rapport technique.
- FERRAZZIN, D., SALSEDO, F., BARBAGLI, F., AVIZZANO, C. A., PIETRO, G. D., BROGNI, A., VIGNONI, M. et BERGAMASCO, M. (2001). The MORIS motorcycle simulator : an overview. Rapport technique, PERCRO, Scuola Superiore S. Anna.
- FETSCH, C. R., TURNER, A. H., DEANGELIS, G. C. et ANGELAKI, D. E. (2009). Dynamic reweighting of visual and vestibular cues during self-motion perception. *The Journal of Neuroscience*, 29(49):15601–15612.
- FIFE, T. D. (2010). Overview of anatomy and physiology of the vestibular system. **In** EGGERS, S. D. et ZEE, D. S., éditeurs : *Vertigo and Imbalance : Clinical Neurophysiology of the Vestibular System. Handbook of Clinical Neurophysiology*, volume 9, chapitre 2, pages 5–17. Elsevier.
- FLORIDI, L. (2005). The philosophy of presence : from epistemic failure to successful observability. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 14(6):656–667.
- FRANK, L., CASALI, J. et WIERVILLE, W. (1988). Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator. *Human Factors*, 30:201–217.

- FREEMAN, J., AVONS, S., MEDDIS, R., PEARSON, D. et IJSSELSTEIJN, W. (2000). Using behavioral realism to estimate presence : A study of the utility of postural responses to motion stimuli. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 9(2):149–164.
- FREEMAN, J., AVONS, S., PEARSON, D. et IJSSELSTEIJN, W. (1999). Effects of sensory information and prior experience on direct subjective ratings of presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(1):1–13.
- FRISSEN, I., CAMPOS, J. L., SOUMAN, J. L. et ERNST, M. O. (2011). Integration of vestibular and proprioceptive signals for spatial updating. *Experimental Brain Research*, 212(2):163–176.
- FUCHS, P., MOREAU, G., BURKHARDT, J. et COQUILLARD, S. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle. Volume 2 - L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel*. Presse de l'Ecole des Mines, Paris, France.
- GARCIA-PALACIOS, A., HOFFMAN, H., CARLIN, A., FURNESS, T. et BOTELLA, C. (2002). Virtual reality in the treatment of spider phobia : a controlled study. *Behaviour Research and Therapy*, 40(9):983–993.
- GAURIAT, P. et LECHNER, D. (1991). Les simulateurs pour la recherche dans le domaine de l'automobile. *Recherche transports sécurité*, 30:43–51.
- GIANNA, C., HEIMBRAND, S. et GRESEY, M. (1996). Thresholds for Detection of Motion Direction During Passive Lateral Whole-Body Acceleration in Normal Subjects and Patients With Bilateral Loss of Labyrinthine Function. *Brain Research Bulletin*, 40(5-6):443–449.
- GIBSON, J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Laurence Erlbaum Associates, Inc., Hillsdale, NJ.
- GODLEY, S. T., TRIGGS, T. J. et FILDES, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident Analysis and Prevention*, 34(5):589–600.
- GOLDBERG, I. et FERNÁNDEZ, C. (1984). The vestibular system. In SMITH, I., éditeur : *Handbook of Physiology. Section 1. The nervous system. vol. III. Sensory Processes. Part 2.*, pages 977–1022. American Psychological Society, Williams and Wilkins., Bethesda, MD.
- GOLDBERG, J. et FERNANDEZ, C. (1971). Physiology of peripheral neurons innervating semicircular canals of the squirrel monkey. I. Resting discharge and response to constant angular accelerations. *Journal of Neurophysiology*, 34(4):635–660.
- GOLDING, J. F. (2006). Motion sickness susceptibility. *Autonomic neuroscience : basic & clinical*, 129:67–76.
- GOLOMER, E., GUILLOU, E., TESTA, M., LECOQ, C. et OHLMANN, T. (2005). Contribution of neck proprioception to subjective vertical perception among experts in physical activities and untrained women. *Neuroscience letters*, 381(1-2):31–35.
- GRABHERR, L., NICOUCAR, K., MAST, F. W. et MERFELD, D. M. (2008). Vestibular thresholds for yaw rotation about an earth-vertical axis as a function of frequency. *Experimental Brain Research*, 186(4):677–681.
- GRANT, P., PAPELIS, Y., SCHWARTZ, C. et CLARK, A. (2004). Enhancements to the NADS motion drive algorithm for low-speed urban driving. In *Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'04)*, pages 67–80, Paris, France.

- GREENBERG, J., ARTZ, B. et CATHEY, L. (2003). The effect of lateral motion cues during simulated driving. *In Driving Simulation Conference of North America (DSC-NA'03)*, Dearborn, MI.
- GROEN, E., HOWARD, I. et CHEUNG, B. (1999). Influence of body roll on visually induced sensation of self tilt and rotation. *Perception*, 28:287–297.
- GROEN, E. L. et BLES, W. (2004). How to use body tilt for the simulation of linear self motion. *Journal of Vestibular Research*, 14:375–385.
- GROEN, E. L., SMAILL, M. H. et HOSMAN, R. J. A. W. (2007). Perception Model Analysis of Flight Simulator Motion for a Decrab Maneuver. *Journal of Aircraft*, 44(2):427–435.
- GROEN, E. L., VALENTI CLARI, M. S. et HOSMAN, R. (2000). Psychophysical thresholds associated with the simulation of linear acceleration. *In Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, pages 1–9, Denver, CO.
- GU, Y., ANGELAKI, D. E. et DEANGELIS, GREGORY, C. (2008). Neural correlates of multi-sensory cue integration in macaque area MSTd. *Nature Neuroscience*, 11(10):1201–1210.
- GU, Y., WATKINS, P. V., ANGELAKI, D. E. et DEANGELIS, G. C. (2006). Visual and nonvisual contributions to three-dimensional heading selectivity in the medial superior temporal area. *The Journal of Neuroscience*, 26(1):73–85.
- GUEDRY, F. E. (1974). Psychophysics of vestibular sensation. *In* KORNHUBER, H., éditeur : *Handbook of Sensory Physiology*, pages 3–154.
- GUERRAZ, M. et POQUIN, D. (1998). Head orientation involvement in assessment of the subjective vertical during whole body tilt. *Perception & Motor Skills*, 87:643–648.
- GUNDRY, A. (1977). Thresholds to roll motion in a flight simulator. *Journal of Aircraft*, 14(7):624–631.
- GUNDRY, A. (1978). Experiments on the detection of roll motion. *Journal of Aircraft*, 49(5):657–664.
- HAIN, T. C., RAMASWAMY, T. S. et HILLMAN, M. A. (2000). Anatomy and physiology of the normal vestibular system. *In* HERDMAN, S. J., éditeur : *Vestibular rehabilitation (2nd édition)*, pages 3–24. Davis, Philadelphia.
- HAWORTH, N., SMITH, R., BRUMEN, I. et PRONK, N. (1997). Case-control study of motorcycle crashes. (Report N° CR 174). Rapport technique, Monash University Accident Research Centre.
- HEERSPINK, H. M., BERKOUWER, W. R., STROOSMA, O., van PAASSEN, M., MULDER, M. et MULDER, J. (2005). Evaluation of vestibular thresholds for motion detection in the SIMONA research simulator. *In Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, pages 1–20, San Francisco, CA.
- HEETER, C. (1992). Being there : the subjective experience of presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2):262–271.
- HELD, R. et DURLACH, N. (1992). Telepresence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1): 109–112.
- HELLIER, E., NAWOOD, A., WALKER, G., HUSBAND, P. et EDWORTHY, J. (2011). The influence of auditory feedback on speed choice, violations and comfort in a driving simulation game. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 14(6):591–599.

- HENDRIX, C. et BARFIELD, W. (1996a). Presence within virtual environments as a function of visual display parameters. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3):274–289.
- HENDRIX, C. et BARFIELD, W. (1996b). The sense of presence within auditory virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3):290–301.
- HILLIS, J. M., WATT, S. J., LANDY, M. S. et BANKS, M. S. (2004). Slant from texture and disparity cues : Optimal cue combination. *Journal of Vision*, 4:967–992.
- HOSKING, S. G., LIU, C. C. et BAYLY, M. (2010). The visual search patterns and hazard responses of experienced and inexperienced motorcycle riders. *Accident Analysis and Prevention*, 42(1):196–202.
- HOSMAN, R. et van der VAART, J. (1978). Vestibular models and thresholds of motion perception. Results of tests in a flight simulator. Report LR-625. Rapport technique, Department of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Delft, Pays-bas.
- HOSMAN, R. et van der VAART, J. (1980). Threshold of motion perception and parameters of vestibular models obtained from tests in a motion simulator. Effect of vestibular and visual motion perception on task performance. **In** *Symposium on the study on motion perception, Recent developments and applications*, Delft, Pays-bas.
- HOWARD, I. (1982). *Human visual orientation*. John Wiley, New-York.
- HOWARD, I. P. (1986). The vestibular system. **In** BOFF, K., KAUFMAN, L. et THOMAS, J., éditeurs : *Handbook of Perception and Human Performance*, chapitre 11, pages 1–30. John Wiley, New-York.
- HOWARD, R., BRAMMER, M., WRIGHT, I., WOODRUFF, P., BULLMORE, E. et ZEKI, S. (1996). A direct demonstration of functional specialization within motion related visual and auditory cortex of the human brain. *Current biology*, 6(8):1015–1019.
- HUANG, J. et YOUNG, L. (1981). Sensation of rotation about a vertical axis with a fixed visual field in different illuminations and in the dark. *Experimental Brain Research*, 41(2):172–183.
- HUANG, J.-K. et YOUNG, L. (1988). Visual field influence on manual roll and pitch stabilization. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 59(7):611–619.
- HUANG, M. et ALESSI, N. (1999). Presence as an emotional experience. **In** WESTWOOD, J., HOFFMAN, H., ROBB, R. et STREDNEY, D., éditeurs : *Medicine Meets Virtual Reality : The Convergence of Physical and Informational Technologies Options for a New Era in Healthcare*, volume 62, pages 148–153. IOS Press, Amsterdam.
- IJSSELSTEIJN, W. (2002). Elements of a multi-level theory of presence : Phenomenology, mental processing and neural correlates. **In** *Proceedings of Presence 2002 : 2nd International Workshop on Presence*, pages 245–259, Porto, Portugal.
- IJSSELSTEIJN, W., de RIDDER, H., FREEMAN, J. et AVONS, S. (2000). Presence : Concept, determinants and measurement. **In** *Proceedings of the SPIE, Human Vision and Electronic Imaging V*, volume 31, pages 520–529, San Jose, CA.
- IJSSELSTEIJN, W., RIDDER, H., FREEMAN, J., AVONS, S. et BOUWHUIS, D. (2001). Effects of stereoscopic presentation, image motion, and screen size on subjective and objective corroborative measures of presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3):298–311.

- IJSSELSTEIJN, W., RIDDER, H. D., HAMBERG, R., BOUWHUIS, D. et FREEMAN, J. (1998). Perceived depth and the feeling of presence in 3DTV. *Displays*, 18:207–214.
- IMBERT, M. (1988). La vision naturelle. Le traitement neuronal de l'information visuelle. *Intellectica*, 5:3–31.
- ISABLEU, B., OHLMANN, T., CREMIEUX, J., VUILLERME, N., AMBLARD, B. et GREY, M. (2010). Individual differences in the ability to identify, select and use appropriate frames of reference for perceptuo-motor control. *Neuroscience*, 169:1199–1215.
- ISRAËL, I., CAPELLI, A., SABLÉ, D., LAURENT, C., LECOQ, C. et BREDIN, J. (2004). Multifactorial interactions involved in linear self-transport distance estimate : a place for time. *International Journal of Psychophysiology*, 53(1):21–28.
- JACOBS, R. (2002a). Visual cue integration for depth perception. In RAJESH, P., RAO, N., OLSHAUSEN, B. et LEWICKI, M., éditeurs : *Probabilistic Models of the Brain*, pages 61–76. MIT press.
- JACOBS, R. A. (2002b). What determines visual cue reliability? *Trends in Cognitive Sciences*, 6(8):345–350.
- JAMSON, A. H. et MOUTA, S. (2004). More bang for your buck ? A cross-cost simulator evaluation study. In *Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'04)*, pages 167–174, Paris, France.
- JAMSON, H. (2000). Driving simulator validity : issues of field of view and resolution. In *Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'00)*, pages 57–64, Paris, France.
- JAMSON, H. (2001). Image characteristics and their effect on driving simulator validity. In *Proceedings of the 1st International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*, pages 190–195.
- JAMSON, H. et MERAT, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour : Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2):79–96.
- JAMSON, H. et SMITH, P. (2003). Are you used to it yet ? Braking performance and adaptation in a fixed base driving simulator. In *Driving Simulation Conference, North America 2003 (DSC-NA'03)*, Dearborn, MI.
- JANSSEN, M., LAUVENBERG, M., van der VEN, W., BLOEBAUM, T. et KINGMA, H. (2011). Perception threshold for tilt. *Otology & Neurotology*, 32(5):818–825.
- JARCHOW, T., WIRZ, M., HASLWANTER, T., DIETZ, V. et STRAUMANN, D. (2003). Perceived horizontal body position in healthy and paraplegic subjects : Effect of centrifugation. *Journal of Neurophysiology*, 90(5):2973–2977.
- JOHNSON, D. M. (2005). Introduction to and Review of Simulator Sickness Research. Research Report 1832. Rapport technique, U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- JOHNSON, D. M. (2007). Simulator Sickness Research Summary. Rapport technique, U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.

- JOHNSON, M. J., CHAHAL, T., STINCHCOMBE, A., MULLEN, N., WEAVER, B. et BÉDARD, M. (2011). Physiological responses to simulated and on-road driving. *International Journal of Psychophysiology*, 81(3):203–208.
- JORDAN, J. (2010). *Gaze direction analysis for the investigation of presence in immersive virtual environments*. Thèse de doctorat, University of London.
- KAGEYAMA, I. et TAGAMI, N. (2002). Development of a riding simulator for two-wheeled vehicles. *Journal of the Society of Automotive Engineers*, 23:347–352.
- KAPLAN, E. et SHAPLEY, R. M. (1986). The primate retina contains two types of ganglion cells, with high and low contrast sensitivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 83:2755–2757.
- KAPPÉ, B., van ERP, J. et KORTELING, J. (1999). Effects of head-slaved and peripheral displays on lane-keeping performance and spatial orientation. *Human Factors*, 41(3):453–466.
- KAPRALOS, B., ZIKOVITZ, D., JENKIN, M. et HARRIS, L. R. (2004). Auditory cues in the perception of self-motion. In *116th Audio Engineering Society Convention*, pages 1–14, Berlin, Germany.
- KAPTEIN, N., THEEUWES, J. et VAN DER HORST, R. (1996). Driving simulator validity : some considerations. *Transportation Research Record*, 1550(1):30–36.
- KATAYAMA, T. (1996). A simulation model for riders control behavior. *Society of Automotive Engineers of Japan Review (JSAE Review)*, 961.
- KAWAKITA, T., KUNO, S., MIYAKE, Y. et WATANABE, S. (2000). Body sway induced by depth linear vection inreference to central and peripheral visual field. *Japanese Journal of physiology*, 50:315–321.
- KEMENY, A. (2001). Recent developments in visuo-vestibular restitution of self-motion in driving simulation. In *Driving Simulation Conference (DSC'01)*, Sophia Antipolis, France.
- KEMENY, A. et PANERAI, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1):31–37.
- KENNEDY, R. et FRANK, L. (1985). A review of motion sickness with special reference to simulator sickness. Rapport technique, Naval Training Equipment Center, Orlando, FL.
- KENNEDY, R. S. et FOWLKES, J. E. (1992). Simulator sickness is polygenic and polysymptomatic : Implications for research. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2(1):23–38.
- KENNEDY, R. S., LANE, N. E., BERBAUM, K. S. et LILIENTHAL, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire : An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3):203–220.
- KHANNA, P., YU, I., MORTENSEN, J. et SLATER, M. (2006). Presence in response to dynamic visual realism : a preliminary report of an experiment study. In *Proceedings of the ACM Symposium Virtual Reality Software and Technology*, pages 364–367.
- KIM, T. et BIOCCA, F. (1997). Telepresence via television : Two dimensions of telepresence may have different connections to memory and persuasion. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2).

- KINGMA, H. (2005). Thresholds for perception of direction of linear acceleration as a possible evaluation of the otolith function. *BMC Ear, Nose and Throat Disorders*, 5(5).
- KLATZKY, R. L. (1998). Allocentric and egocentric spatial representations : definitions, distinctions, and interconnections. **In** *Spatial Cognition, An Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge*, pages 1–18. Springer-Verlag.
- KLEINSCHMIDT, A., THILO, K., BÜCHEL, C., GREY, M., BRONSTEIN, A. et FRACKOWIAK, R. (2002). Neural correlates of visual-motion perception as object- or self-motion. *NeuroImage*, 16(4):873–882.
- KOLASINSKI, E. (1995). Simulator sickness in virtual environments. Rapport technique, U.S. Army Research institute for the Behavioral and Social Sciences.
- KOLB, H. (1979). The inner plexiform layer in the retina of the cat : electron microscopic observations. *Journal of Neurocytology*, 8:295–329.
- KOLB, H. et FAMIGLIETTI, E. V. (1974). Rod and cone pathways in the inner plexiform layer of cat retina. *Science*, 186(4158):47–49.
- KOLB, H., LINBERG, K. A. et FISHER, S. K. (1992). Neurons of the human retina : A Golgi study. *The journal of Comparative Neurology*, 318:147–187.
- KRIJN, M., EMMELKAMP, P. M. G., BIEMOND, R., DE WILDE DE LIGNY, C., SCHUEMIE, M. J. et van der MAST, C. a. P. G. (2004). Treatment of acrophobia in virtual reality : the role of immersion and presence. *Behaviour Research and Therapy*, 42(2):229–239.
- KUGE, N., KUBOTA, M. et ITOH, K. (2002). Study on motion algorithm based on driver centered approach. **In** *Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'02)*, pages 99–108, Paris, France.
- LAPPE, M. (1997). Analysis of self-motion by parietal neurons. **In** THEIR, P. et KARNATH, H.-O., éditeurs : *Parietal lobe contributions to orientation in 3D space*, pages 597–618. Springer-Verlag, New York.
- LARSSON, P., VÄJAMÄE, A., TAJADURA-JIMÉNEZ, A., VÄSTFJÄLL, D. et KLEINER, M. (2005). Auditory-induced presence in mediated environments and related technology. **In** BIOCCHA, F., IJSSSELSTEIJN, W. et FREEMAN, J., éditeurs : *Immersed in Media Experiences : Presence Psychology and Design (Handbook of Presence)*. Lawrence Erlbaum.
- LARSSON, P., VÄSTFJÄLL, D. et KLEINER, M. (2004). Perception of self-motion and presence in auditory virtual environments. **In** *Proceeding of Presence 2004 : the 7th Annual Workshop Presence*, pages 252–258, Valence, Espagne.
- LAVIOLA, J. J. (2000). A Discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM SIGCHI Bulletin*, 32(1):47–56.
- LEPECQ, J.-C., BRINGOUX, L., PERGANDI, J.-M., COYLE, T. et MESTRE, D. (2009). Afforded actions as a behavioral assessment of physical presence in virtual environments. *Virtual Reality*, 13(3):141–151.
- LESSITER, J., FREEMAN, J., KEOGH, E. et DAVIDOFF, J. (2001). A cross-media presence questionnaire : The ITC-Sense of Presence Inventory. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3):282–297.
- LEWIS, J. W. et van ESSEN, D. C. (2000). Corticocortical connections of visual, sensorimotor, and multimodal processing areas in the parietal lobe of the macaque monkey. *The journal of Comparative Neurology*, 428:112–137.

- LIN, J.-W., DUH, H., PARKER, D., ABI-RACHED, H. et FURNESS, T. (2002). Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment. *In Proceedings IEEE Virtual Reality (VR'02)*, pages 164–171. IEEE Comput. Soc.
- LIU, C. C., HOSKING, S. G. et LENNÉ, M. G. (2009a). Hazard perception abilities of experienced and novice motorcyclists : An interactive simulator experiment. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 12(4):325–334.
- LIU, D., MACCHIARELLA, N. et VINCENZI, D. (2009b). Simulation fidelity. *In VINCENZI, D., WISE, J., MOULOUA, M. et HANCOCK, P., éditeurs : Human Factors in Simulation and Training*, chapitre 4, pages 61–73. Taylor and Francis.
- LOMBARD, M. et DITTON, T. (1997). At the Heart of It All : The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2):20.
- LOMBARD, M., DITTON, T. B., CRANE, D., DAVIS, B., GIL-EGUI, G., HORVATH, K. et ROSSMAN, J. (2000). Measuring presence : a literature-based approach to the development of a standardized paper-and-pencil instrument. *In Proceedings of Presence 2000 : The 3rd International Workshop on Presence*, Delft, Pays-bas.
- LOMBARD, M., DITTON, T. B. et WEINSTEIN, L. (2009). Measuring Presence : The Temple Presence Inventory. *In Proceeding of Presence 2009 : the 12th International Workshop on Presence*, pages 1–14, Los Angeles, CA.
- LOMBARD, M. et DUCH, J. (2001). Interactive advertising and presence : a framework. *Journal of Interactive Advertising*, 1(2):56–65.
- LOMBARD, M., WEISTEIN, L. et DITTON, T. (2011). Measuring Telepresence : The Validity of The Temple Presence Inventory ( TPI ) in a Gaming Context. *In The International Society For Presence Research Annual Conference (ISPR)*, Edinbourg, Ecosse.
- MACNEILAGE, P. R., BANKS, M. S., BERGER, D. R. et BÜLTHOFF, H. H. (2007). A Bayesian model of the disambiguation of gravito-inertial force by visual cues. *Experimental Brain Research*, 179(2):263–290.
- MACNEILAGE, P. R., GANESAN, N. et ANGELAKI, D. E. (2008). Computational approaches to spatial orientation : from transfer functions to dynamic Bayesian inference. *Journal of Neurophysiology*, 100(6):2981–2996.
- MALATERRE, G. et FRÉCHAUX, J. (2001). Study of the validity of driving simulators by comparison of tasks performed in real situations and in simulation. *In Actes de séminaire Inrets du 23 janvier 2001*.
- MALBOS, E., MESTRE, D. R., NOTE, I. D. et GELLATO, C. (2008). Virtual reality and claustrophobia : multiple components therapy involving game editor virtual environments exposure. *CyberPsychology & Behavior*, 11(6):695–697.
- MALLERY, R. M., OLOMU, O. U., UCHANSKI, R. M., MILITCHIN, V. a. et HULLAR, T. E. (2010). Human discrimination of rotational velocities. *Experimental Brain Research.*, 204(1):11–20.
- MANN, C. et DAUTERIVE, H. (1949). The perception of the vertical. I. The modification of non-labyrinthine cues. *Journal of Experimental Psychology*, 39:700–707.

- MANTOVANI, G. et RIVA, G. (1999). "Real" presence : How different ontologies generate different criteria for presence, telepresence, and virtual presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5):538–548.
- MAO, Z., YAN, X., ZHANG, H. et WU, C. (2009). Driving simulator validation for drivers' speed behavior. *In Proceedings of the Second International Conference on Transportation Engineering*, pages 476–476. ASCE.
- MARIANI, A. (1983). Giant bistratified bipolar cells in monkey retina. *The Anatomical Record*, 206:215–220.
- MARSHALL, J. (1967). Visual-vestibular interaction and threshold for angular acceleration. Rapport technique, Experimental Psychology Division, US Army Medical Research Lab, Fort Knox, KY.
- MAUNSELL, J. et VAN ESSEN, D. (1983). Functional properties of neurons in middle temporal visual area of the macaque monkey. I. Selectivity for stimulus direction speed and orientation. *Journal of Neurophysiology*, 49:1127–1147.
- MAYHEW, D. R., SIMPSON, H. M., WOOD, K. M., LONERO, L., CLINTON, K. M. et JOHNSON, A. G. (2011). On-road and simulated driving : concurrent and discriminant validation. *Journal of Safety Research*, 42(4):267–275.
- MCCORMICK, E. (1970). *Human factors engineering*. McGraw-Hill, New-York.
- MCGEHEE, D., MAZZAE, E. et BALDWIN, G. (2000). Driver reaction time in crash avoidance research : Validation of a driving simulator study on a test track. *In Proceedings of the 14th Triennial Congress of the International Ergonomics Association and 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, pages 320–323, Santa Monica, CA. Human Factors and Ergonomics Society.
- MCLANE, R. et WIERVILLE, W. (1975). The influence of motion and audio cues on driver performance in an automobile simulator. *Human Factors*, 17:488–501.
- MCLEAN, J. et HOFFMANN, E. (1975). Steering reversals as a measure of driver performance and steering task difficulty. *Human Factors*, 17(3):248–256.
- MEEHAN, M., INSKO, B., WHITTON, M. et BROOKS, F. (2001). Physiological measures of presence in virtual environments. *In Proceedings of Presence 2001 : the 4th international workshop on presence*, pages 21–23, Philadelphie, PA.
- MEEHAN, M., INSKO, B., WHITTON, M. et BROOKS, F. (2002). Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *In ACM Transactions on Graphics, Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002*, volume 21, pages 645–653.
- MEIJAARD, J., PAPADOPOULOS, J. M., RUINA, A. et a.L. SCHWAB (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.
- MEIRY, J. (1965). The vestibular system and human dynamic space orientation. Rapport technique, Man-vehicle control laboratory, Massachussets Institute of Technology, F65-1 1 (NASA, USA, CR-628).
- MERFELD, D. (2009). Canal-otolith interactions. *Encyclopedia of Neuroscience*, 3:589–597.

- MESTRE, D. R. et FUCHS, P. (2006). Immersion and Presence. **In** FUCHS, P., éditeur : *Traité de la Réalité Virtuelle, troisième édition*, pages 309–338. Presse de l’Ecole des Mines, Paris, France.
- MITTELSTAEDT, H. (1983). A new solution to the problem of the subjective vertical. *Naturwissenschaften*, 70(6):272–281.
- MITTELSTAEDT, H. (1992). Somatic versus vestibular gravity reception in man. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 656:124–139.
- MITTELSTAEDT, H. (1996). Somatic graviception. *Biological Psychology*, 42(1-2):53–74.
- MIYAMARU, Y., YAMASAKI, G. et AOKI, K. (2002). Development of a motorcycle riding simulator. *Society of Automotive Engineers of Japan Review (JSAE Review)*, 23:121–126.
- MORICE, A. H., SIEGLER, I. a. et 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.
- MORICE, A. H. P., SIEGLER, I. a., BARDY, B. G. et WARREN, W. H. (2007). Learning new perception-action solutions in virtual ball bouncing. *Experimental Brain Research*, 181(2):249–265.
- MORONEY, W. et MORONEY, B. (1998). Simulation. **In** GARLAND, D., WISE, J. et HOPKIN, V., éditeurs : *Human Factors in Aviation system*, pages 358–388. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ.
- MUDD, S. (1968). Assessment of fidelity of dynamic flight simulators. *Human Factors*, 10(4):351–358.
- NEHAOUA, L. (2008). *Conception et réalisation d’une plateforme mécatronique dédiée à la simulation de conduite des véhicules deux-roues motorisés*. Thèse de doctorat, Université D’Evry-Val d’Essonne.
- NEHAOUA, L., ARIOUI, H. et MAMMAR, S. (2011). Review on single track vehicle and motorcycle simulators. **In** *Proceedings of the 19th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED’11)*, Corfou, Grèce.
- NEIMER, J. et MOHELLEBI, H. (2009). Differential approach to assess the validity of a motion-base driving simulator. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6(7).
- NELSON, J. (1968). Effect of water immersion and body position upon perception of the gravitational vertical. *Aerospace Medicine*, 39:806–811.
- NI, T., BOWMAN, D. et CHEN, J. (2006). Increased display size and resolution improve task performance in Information-Rich Virtual Environments. **In** *Proceedings of Graphics Interface*, pages 139–146.
- NICHOLS, S., HALDANE, C. et WILSON, J. R. (2000). Measurement of presence and its consequences in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(3):471–491.
- NUNEZ, D. (2003). *A connectionist explanation of presence in virtual environments*. Mémoire de master, Université de Cape Town, Afrique de Sud.
- NUNEZ, D. (2007). *A capacity limited, cognitive constructionist model of virtual presence*. Thèse de doctorat, University of Cape Town, Afrique du Sud.
- NUNEZ, D. et BLAKE, E. (2003). Conceptual priming as a determinant of presence in virtual environments. **In** *2nd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa (AFRIGRAPH 2003)*, volume 1, pages 101–108, Cape Town, Afrique du Sud.

- ODP (2010). *Le bilan des déplacements en 2009 à Paris*. Observatoire des Déplacements à Paris (ODP), La Mairie de Paris, Paris, France.
- OHMI, M. (1998). Sensation of self-motion induced by realworld stimuli. In *Selection and Integration of Visual Information : Proceedings of the International Workshop on Advances in Research on Visual Cognition*, pages 175–181, Tsukuba, Japon.
- OKADA, T., GRUNFELD, E. et BRONSTEIN, A. M. (1999). Vestibular perception of angular velocity in normal subjects and in patients with congenital nystagmus. *Brain*, 122:1293–1303.
- OLTMAN, P. (1968). A portable rod-and-frame apparatus. *Perception & Motor Skills*, 26(2):503–506.
- OMAN, C. (1990). Motion sickness : a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 68(2):294–303.
- ONISR (2010). *La sécurité routière en France : Bilan de l'année 2009*. Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière (ONISR), La documentation Française.
- OTAKENO, S., MATTHEWS, R., FOLIO, L., PREVIC, F. et LESSARD, C. (2002). The effects of visual scenes on roll and pitch thresholds in pilots versus nonpilots. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 73(2):98–101.
- OZAWA, K., CHUJO, Y., SUZUKI, Y. et SONE, T. (2003). Psychological factors involved in auditory presence. *Acoustical Science and Technology*, 24(1):42–44.
- PARENT, A. (1998). Life-like Virtual Environments : an Introductory Survey. Rapport technique 41555, NRC/ERB- 1055.
- PARKER, D. E. (1980). The Vestibular Apparatus. *Scientific American*, 243(5):118–135.
- PARRISH, R., DIEUDONNE, J., BOWLES, R. et MARTIN, D. (1975). Coordinated adaptive washout for motion simulators. *Journal of Aircraft*, 12:44–50.
- PATRICK, E., COSGROVE, D., SLAVKOVIE, A., RODE, J. A., VERRATTI, T. et CHISELKO, G. (2000). Using a large projection screen as an alternative to head-mounted displays for virtual environments. In *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '00*, pages 478–485.
- PERRET, D., ORAM, M., HARRIES, M., BEVAN, R., HIETANEN, J., BENSON, P. et THOMAS, S. (1991). Viewer-centred and object-centred coding of heads in the macaque temporal cortex. *Experimental Brain Research*, 86(1):159–173.
- PERRY, D. et NAISH, J. (1964). Flight simulation for research. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 68:645–662.
- PINTO, M. (2007). *Les Interactions Multisensorielles dans la Perception du Mouvement longitudinal. Implications pour les Simulateurs de Conduite*. Thèse de doctorat, Université Grenoble 2.
- PINTO, M., CAVALLO, V. et OHLMANN, T. (2008). Revues de questions. The development of driving simulators : toward a multisensory solution. *Le Travail Humain*, 71(1):62–95.
- PLUMERT, J. M., KEARNEY, J. K., CREMER, J. F. et RECKER, K. (2005). Distance perception in real and virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(3):216–233.

- PRETTO, P., OGIER, M., BÜLTHOFF, H. et BRESCIANI, J.-P. (2009). Influence of the size of the field of view on motion perception. *Computers & Graphics*, 33(2):139–146.
- PROTHERO, J. D. et HOFFMAN, H. D. (1995). Widening the field-of-view increases the sense of presence within immersive virtual environments. Rapport technique, Human Interface Technology Laboratory, University of Washington., Seattle, Washington.
- PROTHERO, J. D., HOFFMAN, H. G., PARKER, D. E., FURNESS, T. A. et WELLS, M. J. (1995). Fore-ground/Background manipulations affect presence. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 39(21):1410–1414.
- PURVES, D., AUGUSTINE, G., FITZPATRICK, D., HALL, W., LAMANTIA, A.-S. et MCNAMARA, J. (2005). *Neurosciences*. De boeck édition.
- RATHERT, G., CREER, B. et SADOFF, M. (1961). The use of piloted flight simulators in general research. Rapport technique, Advisory group for aeronautical research and development, Paris.
- REASON, J. et BRAND, J. (1975). *Motion sickness*. Academic press, London, UK.
- REED, M. P. et GREEN, P. A. (1999). Comparison of driving performance on-road and in a low-cost simulator using a concurrent telephone dialling task. *Ergonomics*, 42(8):1015–1037.
- REHMANN, A., MITMAN, R. et REYNOLDS, M. (1995). A handbook of flight simulation : Fidelity requirements for human factors research. Rapport technique, Crew System Ergonomics Information Analysis Center (CSERIAC), Wright-Patterson AFB, OH.
- REID, L. et NAHON, M. (1985). Flight simulation motion base drive algorithms : part 1 - developing and testing the equations. Rapport technique, University of Toronto, Canada.
- REID, L. D. et NAHON, M. A. (1988). Response of airline pilots to variations in flight simulator motion algorithms. *Journal of Aircraft*, 25(7):639–646.
- REIMER, B., D'AMBROSIO, L. a., COUGHLIN, J. E., KAFRISSEN, M. E. et BIEDERMAN, J. (2006). Using self-reported data to assess the validity of driving simulation data. *Behavior Research Methods*, 38(2):314–324.
- REIMER, B. et MEHLER, B. (2011). The impact of cognitive workload on physiological arousal in young adult drivers : a field study and simulation validation. *Ergonomics*, 54(10):932–942.
- REPA, B., LEUCHT, P. et WIERWILLE, W. (1982). The effects of simulator motion on driver performance. **In** *SAE Technical Paper Series 820307*.
- REYMOND, G., HEIDET, A., CANRY, M. et KEMENY, A. (2000). Validation of Renault ' s dynamic simulator for Adaptive Cruise Control experiments. **In** *Proceedings of the Driving Simulation Conference (DSC'00)*, pages 181–192, Paris, France.
- REYMOND, G., KEMENY, A., DROULEZ, J. et BERTHOZ, A. (1999). Contribution of a motion platform to kinesthetic restitution in a driving simulator. **In** *Proceedings of the Driving Simulation Conference (DSC'99)*, pages 33–55, Paris, France.

- RIECKE, B., SCHULTE-PELKUM, J., AVRAAMIDES, M. N., VON DER HEYDE, M. et BÜLTHOFF, H. H. (2005a). Scene consistency and spatial presence increase the sensation of self-motion in virtual reality. *In ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization (APGV).*, pages 111–118, La Coruna, Espagne.
- RIECKE, B., SCHULTE-PELKUM, J., CANIARD, F. et BÜLTHOFF, H. (2005b). Influence of auditory cues on the visually-induced self-motion illusion (circular vection) in virtual reality. *In Proceedings of Presence 2005 : the 8th Annual Workshop Presence 2005*, pages 49–57, New-York.
- RIECKE, B. E., SCHULTE-PELKUM, J., CANIARD, F. et BÜLTHOFF, H. H. (2005c). Spatialized auditory cues enhance the visually-induced self-motion illusion ( circular vection ) in Virtual Reality. Rapport technique 138, Max-Planck Institute for Biological Cybernetics.
- RIECKE, B. E., VÄLJAMÄE, A. et SCHULTE-PELKUM, J. (2009). Moving sounds enhance the visually-induced self-motion illusion (circular vection) in virtual reality. *ACM Transactions on Applied Perception*, 6(2):1–27.
- RIVA, G. (2009). Is presence a technology issue ? Some insights from cognitive sciences. *Virtual Reality*, 13(3):159–169.
- RIVA, G., MANTOVANI, F., CAPIDEVILLE, C. S., PREZIOSA, A., MORGANTI, F., VILLANI, D., GAGGIOLI, A., BOTELLA, C. et ALCAÑIZ, M. (2007). Affective interactions using virtual reality : the link between presence and emotions. *CyberPsychology & Behavior*, 10(1):45–56.
- RIVA, G., WATERWORTH, J. et WATERWORTH, E. L. (2004a). The layers of presence : a bio-cultural approach to understanding presence in natural and mediated environments. *CyberPsychology & Behavior*, 7(4):405–419.
- RIVA, G., WATERWORTH, J. A. et WATERWORTH, E. L. (2004b). The Layers of Presence : A Bio-cultural Approach and Mediated Environments. *CyberPsychology & Behavior*, 7(4):405–420.
- RIVA, G., WATERWORTH, J. a., WATERWORTH, E. L. et MANTOVANI, F. (2011). From intention to action : The role of presence. *New Ideas in Psychology*, 29(1):24–37.
- ROBILLARD, G., BOUCHARD, P. et RENAULT, L. (2003). Validation de deux mesures importantes en réalité virtuelle : l'Immersive Tendencies Questionnaires et le Presence Questionnaire. *In 25ème Congrès annuel de la Société Québécoise pour la Recherche en Psychologie (QSQRP)*.
- RODIECK, R. (2003). *La vision*. De boeck édition.
- RODIECK, R. W., BINMOELLER, K. F. et DINEEN, J. (1985). Parasol and midget ganglion cells of the human retina. *The Journal of comparative neurology*, 233(1):115–32.
- RUDIN-BROWN, C. M., WILLIAMSON, A. et LENNÉ, M. G. (2009). Can driving simulation be used to predict changes in real-world crash risk ? Rapport technique, Monash university, Accident Research Centre.
- SADOWSKI, W. et STANNEY, K. (2002). Presence in virtual environments. *In STANNEY, K., éditeur : Handbook of virtual environments : design, implementation, and applications*, pages 791–806. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Mahwah, NJ.
- SAITO, H., YUKIE, M., TANAKA, K., HIKOSAKA, K., FUKADA, Y. et IWAI, E. (1986). Integration of direction signals of image motion in the superior temporal sulcus of the macaque monkey. *The Journal of Neuroscience*, 6(1):145–157.

- SAKATA, H., TAIRA, M., KUSUNOKI, M., MURATA, A. et TANAKA, Y. (1997). The parietal association cortex in depth perception and visual control of hand action. *Trends in Neurosciences*, 20(8):350–357.
- SANCHEZ-VIVES, M. V. et SLATER, M. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4):332–339.
- SCHROEDER, R. (2002). Copresence and interaction in virtual environments : An overview of the range of issues. **In** *Presence 2002 : The 5th International Workshop on Presence*, pages 274–295, Porto, Portugal.
- SCHUBERT, T., FRIEDMANN, F. et REGENBRECHT, H. (2001). The experience of presence : factor analytics insights. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3):266–281.
- SCHUBERT, T., REGENBRECHT, H. et FRIEDMANN, F. (2000). Real and illusory interactions enhance presence in virtual environments. **In** *Proceedings of Presence 2000 : The 3rd International Workshop on Presence*.
- SCHUEMIE, M. J. et van der MAST, C. (1999). Presence : Interacting in virtual reality? **In** *Proceedings of the Twentieth Workshop on Language Technology*, Enschede, Pays-Bas.
- SCHUEMIE, M. J., VAN DER STRAATEN, P., KRIJN, M. et VAN DER MAST, C. (2001). Research on Presence in VR : a Survey. *CyberPsychology and Behavior*, 4(2):183–201.
- SHAHAR, A., ALBERTI, C. F., CLARKE, D. et CRUNDALL, D. (2010). Hazard perception as a function of target location and the field of view. *Accident Analysis and Prevention*, 42(6):1577–1584.
- SHARP, B. R. S. (1971). The stability and control of motorcycles. *Journal Mechanical Engineering Science*, 13(5):316–329.
- SHARPLES, S., COBB, S., MOODY, A. et WILSON, J. R. (2008). Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE) : Comparison of head mounted display (HMD), desktop and projection display systems. *Displays*, 29(2):58–69.
- SHERIDAN, T. B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1):120–125.
- SHERRINGTON, C. (1906). On the proprioceptive system, especially in its reflex aspect. *Brain*, 29:467–482.
- SHINAR, D. (1978). *Psychology on the road. The human factor in traffic safety*. John Wiley, New-York.
- SIEGLER, I. (2000). Idiosyncratic orientation strategies influence self-controlled whole-body rotations in the dark. *Cognitive Brain Research*, 9(2):205–207.
- SIEGLER, I., REYMOND, G., KEMENY, A. et BERTHOZ, A. (2001). Sensorimotor integration in a driving simulator : contributions of motion cueing in elementary driving tasks. **In** *Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'01)*, Sophia Antipolis, France.
- SIVAN, R., ISH-SHALOM, J. et HUANG, J.-K. (1982). An optimal control approach to the design of moving flight simulators. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 12(6):818–827.
- SLATER, M. (1999). Measuring presence : a response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5):560–565.

- SLATER, M. (2002). Presence and the sixth sense. *Presence :Teleoperators and Virtual Environments*, 11(4):435–439.
- SLATER, M. (2003). A note on presence terminology. *Presence Connect*, 3(3):1–5.
- SLATER, M., ANTLEY, A., DAVISON, A., SWAPP, D., GUGER, C., BARKER, C., PISTRANG, N. et SANCHEZ-VIVES, M. V. (2006). A virtual reprise of the Stanley Milgram obedience experiments. *PloS one*, 1:e39.
- SLATER, M., BROGNI, A. et STEED, A. (2003). Physiological responses to breaks in presence : a pilot study. **In** *Proceedings of Presence 2003 : The 6th Annual International Workshop on Presence*, pages 3–23, Aalborg, Denmark.
- SLATER, M., LINAKIS, V., USOH, M. et KOOPER, R. (1996). Immersion, presence, and performance in virtual environments : an experiment with tri-dimensional chess. **In** *ACM Symposium on Virtual Reality and Software and Technology Conference (VRST'96)*, pages 163–172, Hong Kong, China.
- SLATER, M., LOTTO, B., ARNOLD, M. M. et SANCHEZ-VIVES, M. V. (2009). How we experience immersive virtual environments : the concept of presence and its measurement. *Anuario de Psicología*, 40(2):193–210.
- SLATER, M. et STEED, A. (2000). A virtual presence counter. *Presence :Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5):413–434.
- SLATER, M., STEED, A., MCCARTHY, J. et MARINGELLI, F. (1998). The influence of body movement on subjective presence in virtual environments. *Human Factors*, 40(3):469–477.
- SLATER, M. et USOH, M. (1994). Body Centred Interaction in Immersive Virtual Environments. **In** MAGNENAT, N. et THALMANN, D., éditeurs : *Artificial Life and Virtual Reality*, pages 125–148. John Wiley and Sons.
- SLATER, M., USOH, M. et CHRYSANTHOU, Y. (1995a). The influence of dynamic shadows on presence in immersive virtual environments. **In** M. GÖBEL, éditeur : *Virtual Environments '95 : Selected Papers of the Eurographics Workshops*, pages 8–21, Monte Carlo.
- SLATER, M., USOH, M. et STEED, A. (1994a). Depth of presence in virtual environments. *Presence :Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2):130–144.
- SLATER, M., USOH, M. et STEED, A. (1994b). Steps and ladders in virtual reality. **In** SINGH, G. et THALMANN, D., éditeurs : *ACM Virtual Reality Science and Technology (VRST)*, pages 45–54.
- SLATER, M., USOH, M. et STEED, A. (1995b). Taking steps : the influence of a walking technique on presence in virtual reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2(3):201–219.
- SLATER, M. et WILBUR, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE) : Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6):603–616.
- SMITH, A. T., WALL, M. B., WILLIAMS, A. L. et SINGH, K. D. (2006). Sensitivity to optic flow in human cortical areas MT and MST. *The European Journal of Neuroscience*, 23(2):561–569.
- STANNEY, K. M., KINGDON, K. S., GRAEBER, D. et KENNEDY, R. S. (2002). Human performance in immersive virtual environments : effects of exposure duration, user control, and scene complexity. *Human Performance*, 15(4):339–366.

- STANNEY, K. M., MOURANT, R. R. et KENNEDY, R. S. (1998a). Human factors issues in virtual environments : a review of the literature. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(4):327–351.
- STANNEY, K. M., SALVENDY, G., DEISINGER, J., MEAD, A., DIZIO, P., MON-WILLIAMS, M., ELLIS, S., NEWMAN, D., ELLISON, J., PIANTANIDA, T., FOGLEMAN, G., REEVES, L., GALLIMORE, J., RIEDEL, O., SINGER, M., STOFFREGEN, T. A., HETTINGER, L., WANN, J., KENNEDY, R., WELCH, R., LACKNER, J., WILSON, J., MAIDA, J. et WITMER, B. (1998b). Aftereffects and sense of presence in virtual environments : formulation of a research and development agenda. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(2):135–187.
- STANTON, N. (1996). Simulators : research and practice. **In** STANTON, N., éditeur : *Human Factors in Nuclear Safety*, pages 117–140. London, taylor and édition.
- STAPLIN, L. (1996). Simulator and field measures of driver age differences in left-turn gap judgements. *Transportation Research Record*, 1485:49–55.
- STEDMON, a. W., HASSELDINE, B., RICE, D., YOUNG, M., MARKHAM, S., HANCOX, M., BRICKELL, E. et NOBLE, J. (2009). 'MotorcycleSim' : an evaluation of rider interaction with an innovative motorcycle simulator. *The Computer Journal*, 54(7):1010–1025.
- STEUER, J. (1992). Defining virtual reality : dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42(4):73–93.
- STEWART, J. (1970). Human perception of angular acceleration and implications in motion simulation. *Journal of Aircraft*, 8(4):248–253.
- STOFFREGEN, T. et RICCIO, G. E. (1991). An ecological critique of the sensory conflict theory of motion sickness. *Ecological Psychology*, 3(3):159–194.
- STOFFREGEN, T. A., BARDY, B. G., SMART, L. J. et PAGULAYAN, R. J. (2003). On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments. **In** HETTINGER, L. J. et HAAS, M. W., éditeurs : *Psychological issues in the design and use of virtual environments*, pages 111–128. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ.
- STOFFREGEN, T. a., HETTINGER, L. J., HAAS, M. W., ROE, M. M. et SMART, L. J. (2000). Postural instability and motion sickness in a fixed-base flight simulator. *Human Factors*, 42(3):458–469.
- STREEPEY, J. W., KENYON, R. V. et KESHNER, E. A. (2007). Field of view and base of support width influence postural responses to visual stimuli during quiet stance. *Gait & posture*, 25(1):49–55.
- SYMMONS, M. et MULVIHILL, C. (2011). A simulator comparison of riding performance between new, returned and continuing motorcycle riders. **In** *Proceedings of the Sixth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, pages 532–538.
- TAN, D. S., GERGLE, D., SCUPELLI, P. et PAUSCH, R. (2003). With similar visual angles, larger displays improve spatial performance. **In** *Proceedings of the conference on Human factors in computing systems - CHI '03*, pages 217–224, Fort Lauderdale, FL. ACM Press.
- TEASDALE, N., NOUGIER, V., BARRAUD, P.-A., BOURDIN, C., DEBU, B., POQUIN, D. et RAPHEL, C. (1999). Contribution of ankle, knee, and hip joints to the perception threshold for support surface rotation. *Perception & Psychophysics*, 61(4):615–624.

- TELBAN, R. J. (2002). A nonlinear motion cueing algorithm with a human perception model. *In Energy, Simulation-training, Ocean Engineering and Instrumentation : Research Papers of the Link Foundation Fellows, Vol. 2.*, pages 97–127. Binghamton, NY.
- TELBAN, R. J., CARDULLO, F. M. et KELLY, L. C. (2005). Motion cueing algorithm development : piloted performance testing of the cueing algorithms. Rapport technique.
- TICHON, J., WALLIS, G. et MILDRED, T. (2006). Virtual training environments to improve train driver's crisis decision making. *In Proceedings of SimTect 2006*, Melbourne, Australia.
- TICHON, J. G. (2007). Using presence to improve a virtual training environment. *CyberPsychology & Behavior*, 10(6):781–787.
- TÖRNROS, J. (1998). Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel - a validation study. *Accident Analysis and Prevention*, 30(4):497–503.
- TREISMAN, M. (1977). Motion sickness : an evolutionary hypothesis. *Science*, 197:493–495.
- UNDERWOOD, G., CRUNDALL, D. et CHAPMAN, P. (2011). Driving simulator validation with hazard perception. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 14(6):435–446.
- USOH, M., ALBERTO, C. et SLATER, M. (1996). Presence : experiments in the psychology of virtual environments. Rapport technique, Department of Computer Science, University College London, UK.
- USOH, M., CATENA, E., ARMAN, S. et SLATER, M. (2000). Using presence questionnaires in reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5):497–503.
- VALENTE PAIS, A., WENTINK, M., van PAASSEN, M. et MULDER, M. (2009). Comparison of three motion cueing algorithms for curve driving in an urban environment. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 18(3):200–221.
- VALJÄMÄE, A. (2005). *Self-motion and presence in the perceptual optimization of a multisensory virtual reality environment*. Thesis for the degree of licentiate of engineering, rapport technique n° r037/2005, Chalmers University of Technology.
- VÄLJAMÄE, A. (2009). Auditorily-induced illusory self-motion : a review. *Brain research reviews*, 61:240–255.
- van BAREN, J. et IJSSELSTEIJN, W. (2004). Measuring presence : a guide to current measurement approaches. Rapport technique, OmniPres project IST-2001-39237.
- VAN DER STEEN, F. (1998). An earth-stationary perceived visual scene during roll and yaw motions in a flight simulator. *Journal of Vestibular Research*, 8(6):411–425.
- VAN ERP, J. B. et PADMOS, P. (2003). Image parameters for driving with indirect viewing systems. *Ergonomics*, 46(15):1471–1499.
- VANRULLEN, R. et THORPE, S. J. (2001). The time course of visual processing : from early perception to decision-making. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(4):454–61.
- VÄSTFJÄLL, D. (2004). The Subjective Sense of Presence, Emotion Recognition, and Experienced Emotions in Auditory Virtual Environments . *CyberPsychology & Behavior*, 6(2):181–188.

- VAUGOYEAU, M., VIEL, S., AMBLARD, B., AZULAY, J. P. et ASSAIANTE, C. (2008). Proprioceptive contribution of postural control as assessed from very slow oscillations of the support in healthy humans. *Gait & posture*, 27(2):294–302.
- VIDOTTO, G., BASTIANNELLI, A., SPOTO, A. et 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.
- VINGERHOETS, R. A. A., MEDENDORP, W. P. et GISBERGEN, J. A. M. V. (2008). Body-Tilt and Visual Verticality Perception During Multiple Cycles of Roll Rotation. *Journal of Neurophysiology*, 99:2264–2280.
- VORDERER, P., WIRTH, W., GOUVEIA, F. R., BIOCCA, F., SAARI, T., JÄNCKE, F., BÖCKING, S., SCHRAMM, H., GYSBERS, A., HARTMANN, T., KLIMMT, C., LAARNI, J., RAVAJA, N., SACAU, A., BAUMGARTNER, T. et JÄNCKE, P. (2004). MEC Spatial Presence Questionnaire (MEC SPQ) : short documentation and instructions for application. Report to the European Community, Project Presence : MEC (IST- 2001-37661). Rapport technique.
- WALLIS, G., TICHON, J. et MILDRED, T. (2007). Speed perception as an objective measure of Presence in virtual environments. **In** *SimTecT 2007 Conference*, Brisbane, Queensland Australia. Simulation Industry Association of Australia.
- WANG, S.-c. et FU, L.-C. (2004). Predictive washout filter design for VR-based motion simulator. **In** *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pages 6291–6295.
- WANG, Y., MEHLER, B., REIMER, B., LAMMERS, V., D'AMBROSIO, L. A. et COUGHLIN, J. F. (2010). The validity of driving simulation for assessing differences between in-vehicle informational interfaces : A comparison with field testing. *Ergonomics*, 53(3):404–420.
- WATERWORTH, E. et WATERWORTH, J. (2001). Focus, locus, and sensus : The three dimensions of virtual experience. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2):203–213.
- WATSON, G. (2000). A synthesis of simulator sickness studies conducted in a high-fidelity driving simulator. **In** *Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'00)*, pages 69–78, Paris, France.
- WELCH, R. B., BLACKMON, T. T., LIU, A., MELLERS, B. A. et STARK, L. W. (1996). The effects of pictorial realism, delay of visual feedback, and observer interactivity on the subjective sense of presence. *PresenceTeleoperators and Virtual Environments*, 5(3):263–273.
- WIERDERHOLD, B., JANG, D., KANEDA, M., CABRAL, I., LURIE, Y., KIM, I., WIERDERHOLD, M. et KIM, S. (2001). An investigation into physiological responses in virtual environments : an objective measurement of presence. **In** RIVA, G. et GALIMBERTI, C., éditeurs : *Towards CyberPsychology : Mind, Cognitions and Society in the Internet Age*, pages 175–184. IOS Press, Amsterdam.
- WILDZUNAS, R., BARRON, T. et WILEY, R. (1996). Visual display delay effects on pilot performance. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 67(3):214–221.
- WIRTH, W., HARTMANN, T., BÖCKING, S., VORDERER, P., KLIMMT, C., SCHRAMM, H., SAARI, T., LAARNI, J., RAVAJA, N., GOUVEIA, F. R., BIOCCA, F., SACAU, A., JÄNCKE, L., BAUMGARTNER, T. et JÄNCKE, P. (2007). A process model of the formation of spatial presence experiences. *Media Psychology*, 9:493–525.

- WITKIN, H. et ASCH, S. (1948). Studies in space orientation : IV. Further experiments on perception of the upright with visual fields. *Journal of Experimental Psychology*, 38:762–782.
- WITMER, B. et SINGER, M. (1998). Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3):225–240.
- WITMER, B. G., JEROME, C. J. et SINGER, M. J. (2005). The factor structure of the Presence Questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 14(3):298–312.
- WRIGHT, W. G., DIZIO, P. et LACKNER, J. R. (2006). Perceived self-motion in two visual contexts : Dissociable mechanisms underlie perception. *Journal of Vestibular Research*, 16(1):23–28.
- YAMASAKI, G., AOKI, K., MIYAMARU, Y. et OHNUMA, K. (1998). Development of motorcycle training simulator. *Society of Automotive Engineers of Japan Review (JSAE Review)*, 19:81–85.
- YAMASAKI, G., MITSURU, I. et MIYAMARU, Y. (1996). Riding Simulation System for motorcycles.
- YAN, X., ABDEL-ATY, M., RADWAN, E., WANG, X. et CHILAKAPATI, P. (2008). Validating a driving simulator using surrogate safety measures. *Accident Analysis and Prevention*, 40(1):274–288.
- YI, Y. et PARK, S. (2009). Effect of reduced cutaneous cues on motion perception and postural control. *Experimental Brain Research*, 195:361–369.
- YOUNG, L. (1984). Perception of the body in space : mechanisms. **In** SMITH, I., éditeur : *Handbook of Physiology. The nervous system*, chapitre 3, pages 1023–1066. New York Academic Press.
- YOUNGBLUT, C. (2003). Experience of presence in virtual environments. Rapport technique, Institute for defense analyses, Alexandria, VA.
- YOUNGBLUT, C. et HUIE, O. (2003). The Relationship Between Presence and Performance in Virtual Environments : Results of a VERTS Study. **In** *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR'03)*, volume 2003, pages 277–278.
- ZAHORIK, P. et JENISON, R. L. (1998). Presence as being-in-the-world. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(1):78–89.
- ZEKI, S. (1980). The representation of colours in the cerebral cortex. *Nature*, 284(5755):412–418.
- ZOCCOLOTTI, P., ANTONUCCI, G., GOODENOUGH, D. R., PIZZAMIGLIO, L. et SPINELLI, D. (1992). The role of frame size on vertical and horizontal observers in the rod-and-frame illusion. *Acta Psychologica*, 79(2):171–187.



## Résumé de la thèse

Les environnements virtuels, et en particulier les simulateurs de conduite à plate-forme dynamique, posent la délicate question de la restitution multisensorielle en vue de générer la bonne "illusion" pour leurs utilisateurs. Si la réalité virtuelle est reconnue pour la limitation des coûts, le gain temporel et la contrôlabilité et reproductibilité des situations étudiées, la problématique de la validité de ces outils de recherche (ou de formation) est cruciale pour la transférabilité des connaissances produites.

Constituant une première étape dans le processus de validation du simulateur IFSTTAR, ce travail s'appuie sur une démarche originale reposant sur une double évaluation, par élément et globale. Il s'agit (i) de configurer de manière optimale les caractéristiques immersives et interactives du simulateur liées au mouvement de roulis afin de produire une illusion d'inclinaison crédible et acceptée, et (ii) d'évaluer, de manière globale, différentes configurations du simulateur (modèles dynamiques de véhicule) au moyen de mesures objectives (temps de familiarisation) et subjectives (présence, mal du simulateur).

Prises dans leur ensemble, les sept études menées durant cette thèse ont permis de valider une plage de restitution du mouvement de roulis pertinente pour produire une sensation d'inclinaison sans entraîner de déséquilibre critique ou de sensation de chute. Un angle d'inclinaison du simulateur au-delà de 11,4 degrés est ainsi déconseillé pour éviter toute sensation de chute, néanmoins cette valeur est susceptible d'être influencée par divers facteurs (e.g., présence d'informations visuelles, positionnement de l'axe de roulis). Ces études ont également permis d'identifier, en conduite passive, les paramètres nécessaires ainsi que les contributions relatives des informations visuelle et inertielle pour la production d'une sensation d'inclinaison crédible. En conduite active, l'évaluation du degré de contrôle des participants en fonction du modèle dynamique de véhicule (virtuel) a permis de pointer les faiblesses actuelles du simulateur IFSTTAR afin de proposer plusieurs pistes de développement.

**mots-clefs** : Validité des simulateurs ; Simulation moto ; Démarche centrée-utilisateur ; Perception du roulis ; Présence ; Champ de vision ; Restitution de mouvement ; Modèle dynamique de véhicule.

## Abstract

Virtual environments, and specifically motion-based driving simulators, raise the delicate question of multisensory cueing in order to produce the good "illusion" to the users. If virtual reality is well acknowledged for cost limitation, validity issue of these research (or training) tools is critical for knowledge transfer of new results.

As a first step in the validation process of the IFSTTAR motorcycle simulator, this work relies upon an original design based on a double approach : by element and global. It consists in (i) optimal balancing of simulator's immersive and interactive characteristics linked to roll motion so as to yield a believable and embraced leaning illusion, and (ii) evaluating more generally different simulator configurations (vehicle dynamic models) through objective (training length) and subjective measures (presence, simulator sickness).

Taken as a whole, the seven studies conducted during this thesis enable the validation of the relevant range of roll motion cueing to produce a leaning sensation without leading to a critical unbalance or fall sensation. A leaning angle of the simulator beyond 11.4 degrees is not recommended to avoid any fall sensation, however this figure can be influenced by various factors (e.g., visual informations, roll axis location). These studies also allow to identify, in passive driving situations, the necessary parameters as well as the relative contribution of visual and inertial informations for the production of a believable leaning sensation. In an active driving situation, the evaluation of the degree of users control through different (virtual) vehicles dynamic models has permitted to highlight the weaknesses of IFSTTAR simulator in order to set several guidelines for further development.

**Keywords** : Simulator validity ; Motorcycle simulation ; User-centred design ; Roll perception ; Presence ; Field of view ; Motion cueing ; Vehicle dynamic model.