HAL
open science

Réduction du mal du simulateur lors de la simulation longue durée pour la validation de véhicules autonomes

Guillaume Lucas

To cite this version:

Guillaume Lucas. Réduction du mal du simulateur lors de la simulation longue durée pour la validation de véhicules autonomes. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. HESAM Université, 2021. Français. NNT : 2021HESAE006 . tel-03407970

HAL Id: tel-03407970

https://pastel.hal.science/tel-03407970v1

Submitted on 28 Oct 2021

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

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

HESAM UNIVERSITÉ

Arts et Métiers Sciences et Technologies

2019-ENAM-00XX

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

Doctorat

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Informatique – Traitement du Signal "

présentée et soutenue publiquement par

Guillaume LUCAS

le 26 janvier 2021

Réduction du mal du simulateur

lors de la simulation longue durée pour la validation de véhicules autonomes

Directeur de thèse : **Andras KEMENY**
Co-encadrement de la thèse : **Florent COLOMBET et Damien PAILLOT**

Jury

M. Jean-Christophe POPIEUL, Professeur, LAMIH, UPHF	Président
M. Stéphane ESPIE, Directeur de recherche, IFSTTAR, Université Eiffel	Rapporteur
M. Baptiste SANDOZ, Maitre de conférences, IBHGC, Arts & Métiers	Examinateur
M. Philippe FUCHS, Professeur, Mines ParisTech	Examinateur
M. Andras KEMENY, Professeur associé, Arts & Métiers	Examinateur
M. Damien PAILLOT, Maitre de conférences, Université Bourgogne	Examinateur
M. Florent COLOMBET, Ingénieur, Groupe Renault	Invité
M. Frédéric MERIENNE, Professeur, Institut Image, Arts & Métiers	Invité

T H È S E

Arts et Métiers - Campus de Cluny
LISPEN -- Institut Image

RÉSUMÉ

Le véhicule autonome est considéré comme l'une des innovations majeures de ces prochaines décennies. Il est donc crucial de pouvoir évaluer et valider en amont les systèmes intelligents complexes mis en jeux dans ces futurs véhicules ainsi que leurs interactions avec le conducteur. C'est pourquoi les outils de simulation sont privilégiés afin de pouvoir réaliser les milliards de kilomètres de roulage nécessaire, ainsi que les cas critiques, sans mettre en danger les usagers. La simulation de conduite driver in the loop *: humain dans la boucle* sera particulièrement utile afin d'étudier et de valider les phases de conduite hybride, comme la délégation ou la reprise de conduite par le conducteur. Cependant, l'utilisation des simulateurs de conduite immersifs est notamment limitée par le mal du simulateur. En effet, ce phénomène similaire au mal des transports peut affecter les performances et la tâche du conducteur, ainsi que limiter le temps de simulation.

Cette thèse « Réduction du mal du simulateur lors de la simulation longue durée pour la validation de véhicules autonomes » a été réalisée dans le cadre d'un contrat CIFRE établi entre les Arts et Métiers d'une part et le groupe Renault d'autre part. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à comprendre ce phénomène à travers la littérature. Nous nous sommes particulièrement intéressés à ses origines ainsi qu'aux différents facteurs pouvant influer sur celui-ci. Ces analyses nous ont permis d'identifier différents leviers pouvant permettre de réduire le mal du simulateur. Nous réalisons, dans un second temps, une série d'expérimentations afin de tester et mettre en place nos solutions retenues. La première s'intéresse à l'effet d'ajout de modalités vibratoires de la cabine. La seconde expérience s'applique à corriger un écart de latences entre la dynamique et le visuel. Finalement, la dernière étude s'intéresse aux déclenchements de réflexes oculaires inattendu, par les algorithmes de contrôle de mouvement.

La thèse présentera les résultats expérimentaux de la réduction des symptômes de mal du simulateur par l'intégration de vibrations ou de compensation de latences. Elle exposera également le déclenchement inopiné de mécanismes oculomoteurs pouvant être source d'oscillopsies, voire de symptômes de cinétose. Permettant ainsi des pistes d'améliorations significatives du mal de simulateur, afin de mener les campagnes d'analyses et de validation du véhicule autonome.

Mots clés : Mal du simulateur, Simulation driver-in-the-loop, Véhicule autonome.

ABSTRACT

Autonomous vehicles are considered to be the major innovation vehicle of the coming decades. It is therefore crucial to be able to assess and validate upstream the complex intelligent systems involved in these future vehicles as well as their interactions with the driver. This is why simulation tools are favored in order to be able to carry out the billions of kilometers of driving required, as well as critical cases, without endangering users. The driving simulation driver in the loop *: humain dans la boucle* will be particularly useful in order to study and validate the phases of hybrid driving, such as the delegation or resumption of driving by the driver. However, the use of immersive driving simulators is particularly limited by the simulator sickness. Indeed, this phenomenon, similar to motion sickness, can affect the driver's performance and task of the driver, as well as limit the simulation time.

This thesis « Reducing simulator sickness during long-term simulation for autonomous vehicle validation » was carried out within the framework of a CIFRE contract between Arts et Métiers on the one hand and the Renault group on the other hand. First, we were interested in understanding this phenomenon through the literature. We were particularly interested in its origins as well as the various factors that can influence it. These analyzes allowed us to identify different levers that could allow us to reduce the simulator sickness. We then carry out a series of experiments in order to test and implement our chosen solutions. The first experiment focuses on the effect of adding vibratory modalities of the cabin. The second one applies to correct a latency gap between the dynamics and the visual. Finally, the last study is interested in the possible triggering of unexpected ocular reflexes by motion control algorithms.

The thesis will present the experimental results of the diminution of symptoms of simulator sickness through the integration of vibrations or compensation of latencies. It will also expose the unexpected triggering of oculomotor mechanisms that can be a source of oscillopsias, or even symptoms of motion sickness. Thus allowing avenues for significant improvements of simulator sickness, in order to conduct autonomous vehicle analysis and validation campaigns.

Keywords : Simulator sickness, Driver-in-the-loop simulation, Autonomous vehicle.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier Andras de m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse en acceptant d'en prendre la direction. À l'initiative de cette thèse, il m'a encouragé à entreprendre ce projet qui s'est avéré très formateur, à l'intersection de plusieurs disciplines scientifiques. Je remercie également Florent, encadrant de cette thèse dans l'entreprise, pour son suivi rigoureux et son soutien permanent. Ainsi que Damien, encadrant à l'institut image, pour son suivi à distance et ses corrections orthographiques. Je les remercie également tous les trois de la confiance qu'ils m'ont accordée en me laissant une très grande liberté d'exploration.

J'aimerais remercier ensuite les membres de mon jury. MM. Stéphane Espié et Jean-Christophe Popieul, qui me font l'honneur de bien vouloir être rapporteurs de ce manuscrit. Je remercie également MM. Baptiste Sandoz et Philippe Fuchs d'avoir accepté d'être examinateurs de mes travaux de thèse.

Un grand merci à tous les collègues que j'ai pu côtoyer chez Renault pendant la durée de mon doctorat, qu'ils soient doctorants, employés, prestataires ou stagiaires. En premier lieu, au groupe des doctorants du service, Carolina, Mhappy, Benoit, Léa, Armand et Bérénice ; pour leur accueil, leur compagnie, leur aide et nos réflexions scientifiques. À Morgane, Younesse, Clara, Delphine et Jérémy, pour leur soutien et les nombreuses pauses thé. Au groupe de doctorants Renault pour les repas du vendredi. À Mathieu et aux membres kitesurfeurs. Pour finir, à mon service et mon équipe Renault qui m'ont accueilli et permis de réaliser mes études expérimentales sur les simulateurs.

Un remerciement à toutes les personnes que j'ai eu l'opportunité de croiser lors de cette aventure et qui y ont contribué par leurs réflexions, à Renault, à l'Institut Image, lors de conférences, de formations, de soirées, etc.

Je remercie également toutes les personnes qui ont accepté d'être sujets pour mes différentes études expérimentales, malgré le mal du simulateur.

Au-delà du contexte de la thèse, je remercie aussi mes amis qui m'ont soutenu dans ce périple, Clément sur SC, Sylvie à Paris, Thomas et ses concerts, Gabriel à Munich, Tanguy en MJ, ainsi que tous ceux que je n'ai pas cités. Je tiens à remercier particulièrement Mathilde qui m'a supporté pendant le 2e confinement et qui a corrigé mes

nombreuses fautes d'orthographe et de grammaire. Ses relectures minutieuses, en dépit de sa méconnaissance du sujet, m'ont permis de rendre ce manuscrit plus lisible.

Merci à mes parents pour leur soutien et encouragements permanents, notamment durant la période de rédaction et de correction de la thèse, auxquelles ils ont participé. Ainsi qu'à mon frère qui a su me changer les idées malgré la distance depuis le Québec.

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures **xi**

Liste des tableaux **xv**

Liste des acronymes **xvii**

1 Introduction et contexte **1**
1.1 Avant-propos 1
1.2 Simulation pour la validation du véhicule autonome 3
1.2.1 Le véhicule autonome 3
1.2.2 Les niveaux d'autonomies 5
1.2.3 Le paradoxe de la validation 7
1.2.4 La simulation pour la validation 9
1.3 Méthodologie de travail 13
1.3.1 Objectifs et problématique 13
1.3.2 Plan de lecture 13
1.4 Contexte de travail 15
1.4.1 Centre de simulation Renault 15
1.4.2 Institut image 17
1.4.3 LiV 18

2 Perception du mouvement en simulateur **19**
2.1 Sensorialité humaine et perception du mouvement 19
2.1.1 Système visuel 20
2.1.2 Perception visuelle du mouvement 25
2.1.3 Système vestibulaire 30
2.1.4 Audition 37
2.1.5 Somesthésie 40
2.2 Simulation de conduite automobile 43
2.2.1 Simulateur de conduite 43
2.2.2 Histoire et grands simulateurs 44
2.2.3 Architecture et composants des simulateurs 48
2.2.4 Restitution visuelle 51
2.2.5 Restitution inertielle 57

3 Le mal du simulateur **61**
3.1 Les cinétoses et le mal du simulateur . . . 61
3.1.1 Définition des cinétoses . . . 62
3.1.2 Différents types de cinétoses . . . 63
3.1.3 Le mal du simulateur . . . 64
3.1.4 Implications . . . 65
3.2 Théories . . . 67
3.2.1 La théorie des conflits neurosensoriels . . . 67
3.2.2 La théorie évolutionnaire d'intoxication . . . 70
3.2.3 La théorie écologique de l'instabilité posturale . . . 72
3.2.4 L'hypothèse du cadre stationnaire . . . 74
3.2.5 Les théories et hypothèses des réflexes oculaires . . . 76
3.2.6 La théorie de la verticale subjective . . . 77
3.2.7 Conclusion sur les théories . . . 78
3.3 Facteurs et effets . . . 80
3.3.1 Effets liés au mal du simulateur . . . 80
3.3.2 Étiologie . . . 84
3.3.3 Évaluations, mesures et prédictions des symptômes . . . 93
3.3.4 Cinétoses et véhicule autonome . . . 96
3.4 Réduire le mal du simulateur . . . 99
3.4.1 Préconisations . . . 99
3.4.2 Médications . . . 100
3.4.3 L'adaptation . . . 101
3.4.4 Autres solutions . . . 102
3.4.5 Application chez Renault . . . 106

4 Étude : Ajout de modalités vibratoires **109**
4.1 Les vibrations pour la simulation de conduite . . . 109
4.1.1 Amélioration de l'immersion . . . 109
4.1.2 Vibrations d'une voiture sur route . . . 110
4.1.3 Restitution vibratoire en simulation de conduite . . . 111
4.2 Effets des vibrations du corps . . . 113
4.2.1 Effets sur le corps . . . 114
4.2.2 Effets sur les cinétoses . . . 115
4.3 Hypothèses de l'étude . . . 117
4.3.1 Des vibrations réalistes . . . 117
4.3.2 Des vibrations perturbatrices . . . 118
4.4 Protocole expérimental . . . 119
4.4.1 Le Simulateur . . . 119
4.4.2 Scénario de conduite . . . 120
4.4.3 Génération des vibrations . . . 122
4.4.4 Mesures . . . 124
4.4.5 Participants et déroulement . . . 125
4.5 Résultats . . . 127
4.5.1 Simulator Sickness Questionnaire . . . 127
4.5.2 Mesure posturale . . . 129
4.5.3 Classement des configurations . . . 132

4.6 Discussion . . . 133
4.6.1 Effets des vibrations . . . 133
4.6.2 Ouvertures . . . 134
4.7 Conclusion . . . 136

5 Étude : Correction de l'écart de latence 137
5.1 Simulation de conduite et latences . . . 137
5.1.1 Latences des simulateurs . . . 137
5.1.2 Perception de la latence . . . 138
5.1.3 Effets de la latence . . . 139
5.1.4 Hypothèse de l'étude . . . 140
5.2 Mesures des latences . . . 141
5.2.1 Mesure de la latence de mouvement . . . 141
5.2.2 Mesure de la latence visuelle . . . 143
5.3 Analyse de la correction de l'écart de latence . . . 146
5.3.1 Protocole expérimental . . . 146
5.3.2 Correction de la latence . . . 146
5.3.3 Scénario de conduite . . . 147
5.3.4 Mesures . . . 148
5.3.5 Participants . . . 148
5.4 Résultats . . . 150
5.4.1 Simulator Sickness Questionnaire . . . 150
5.4.2 Questionnaires et commentaires . . . 151
5.5 Discussion . . . 153
5.5.1 Mesures des latences . . . 153
5.5.2 Réduction du mal du simulateur . . . 153
5.5.3 Perspectives d'amélioration . . . 154
5.6 Conclusion . . . 155

6 Étude : Mesure du réflexe vestibulo-oculaire 157
6.1 Le réflexe vestibulo-oculaire . . . 157
6.1.1 Description . . . 158
6.1.2 Combinaison avec le réflexe optocinétique . . . 159
6.1.3 Mesures et caractéristiques . . . 161
6.1.4 Adaptation et cinétoses . . . 163
6.2 Simulation et réflexe vestibulo-oculaire . . . 165
6.2.1 Rendu inertiel par inclinaison . . . 165
6.2.2 Hypothèses d'étude . . . 167
6.2.3 Objectif de l'étude . . . 168
6.3 Protocole de mesure . . . 169
6.3.1 Système et contrôle plate-forme . . . 169
6.3.2 Scénario de conduite . . . 170
6.3.3 Mesures . . . 171
6.3.4 Déroulement de l'étude . . . 172
6.3.5 Participants . . . 174
6.4 Résultats . . . 175
6.4.1 Analyse des données . . . 175

6.4.2 Données inexploitables 177
6.4.3 Mesures du RVO 178
6.4.4 Corrélation 180
6.5 Discussion 181
6.5.1 Identification du RVO 181
6.5.2 Caractéristiques du RVO 182
6.5.3 RVO et cinétoses 183
6.5.4 Remarques générales 184
6.6 Conclusion 185

7 Conclusion générale **187**
7.1 Synthèse et discussion 187
7.2 Applications et perspectives 189

Bibliographie **191**

Webographie **209**

Annexes **211**
Annexes de l'étude : Ajout de modalités vibratoires I
Questionnaire préliminaire II
Questionnaire SSQ III
Article DSC 2018 IV
Article Transport Research part F VII
Annexes de l'étude : Correction de l'écart de latence XV
Questionnaire préliminaire XVI
Questionnaire de ressenti XVII
Questionnaire SSQ XVIII
Poster DSC 2019 XIX
Annexes de l'étude : Mesure du réflexe vestibulo-oculaire XXI
Aperçu du questionnaire XXII

TABLE DES FIGURES

1.1 Accidentologie théorique avec l'automatisation des véhicules [W. Wachenfeld et Winner 2016] . . . 3
1.2 Une des voitures autonomes Waymo circulant actuellement sur les routes américaines (www.futura-sciences.com) . . . 4
1.3 Concept car de Robot-taxis Renault EZ-GO . . . 5
1.4 Renault Zoé autonome en test à Rouen . . . 5
1.5 SAE J3016™ : Niveaux d'automatisation des véhicules (https://www.sae.org/) . . . 6
1.6 Chiffre clés des accidents sur autoroute en France, de l'ASFA [*Association des sociétés françaises d'autoroutes*] . . . 8
1.7 Exemple de méthodologie de validation physique/numérique (Enable S3 [*Project*]) . . . 10
1.8 Exemple de simulation driver in the loop . . . 11
1.9 Quelques simulateurs automobile du centre de simulation Renault . . . 16
1.10 Le simulateur dynamique haute performance ULTIMATE . . . 16
1.11 Vue d'artiste du futur simulateur ROADS . . . 17
1.12 Quelques simulateurs automobiles de l'institut Image . . . 18

2.1 Représentation schématique d'une coupe transversale de l'œil (www.provisu.ch) . . . 20
2.2 Représentation schématique d'une coupe transversale de l'œil [Bear et al. 2002] . . . 21
2.3 Représentation schématique d'une section de la rétine et de ces différentes couches cellulaires [Bear et al. 2002] . . . 22
2.4 Répartition radiale des photorécepteurs, passant par la fovéa et le point aveugle (www.maxicours.com) . . . 23
2.5 Courbe d'absorbance des cônes et bâtonnets chez l'homme . . . 23
2.6 Le champ de vision humain et sa décomposition (fr.wikipedia.org) . . . 24
2.7 Structures possibles de flux rétiniens [Lappe et al. 1999] . . . 26
2.8 Exemples de stimulation visuelle pour l'étude des vections [Neimer 2002] 27
2.9 Schéma de l'accommodation de l'œil par déformation du cristallin (www.guide-vue.fr) . . . 29
2.10 Schéma du changement de vergence des yeux (acces.ens-lyon.fr) . . . 29
2.11 Explication de la parallaxe de mouvement [Sandini et al. 2001] . . . 30

2.12 Place de l'oreille interne dans l'os temporal (fr.wikipedia.org) 30
2.13 Le système vestibulaire de l'Homme [Bear et al. 2002] 31
2.14 Positions et orientations des systèmes vestibulaires et des canaux semi-circulaires [Bear et al. 2002] 32
2.15 Vue en coupe de la crête ampullaire d'un canal semi-circulaire [Bear et al. 2002] 33
2.16 Mouvement de l'endolymphe et de la crête ampullaire lors d'une rotation du canal semi-circulaire [Bear et al. 2002] 33
2.17 Positions et orientations de l'utricule et du saccule [Bear et al. 2002] . . 34
2.18 Vue en coupe schématique de la macula d'un organe otolithique [Bear et al. 2002] 36
2.19 Fonctionnement des organes otolithiques en accélération [Bear et al. 2002] 37
2.20 Explication de l'ambiguité gravito-inertielle [Bear et al. 2002] 38
2.21 Représentation schématique du système auditif [Bear et al. 2002] 39
2.22 Décalage temporel du signal binaural 40
2.23 Différence d'amplitude du signal sonore spatial (www.neuroreille.com) . 40
2.24 Les débuts de la simulation de vol (fr.wikipedia.org) 44
2.25 Simulateur du MITI, à projection vidéo d'une maquette [Hirose et al. 1976] 45
2.26 Simulateur de tenue de route et confort [Kohr 1961] 46
2.27 Simulateur Daimler-Benz [Drosdol et Panik 1985] 46
2.28 Simulateur VTI 1 [Nordmark, Lidstrom et al. 1984] 47
2.29 Simulateur NADS 48
2.30 Simulateur Toyota 48
2.31 Schéma d'architecture simulateur 49
2.32 Système de projection utilisé pour de grands écrans concaves 52
2.33 Description schématique de l'ouverture du champ de visuel d'un observateur face à un écran 53
2.34 Gamuts des principales normes d'affichage dans le diagramme de chomaticité humain (CIE 1931) 55
2.35 Exemple de plateforme 6 axes 58

3.1 Les différentes cinétoses 62
3.2 Un modèle heuristique du contrôle moteur et des cinétoses basé sur la théorie du réarrangement sensoriel [Benson 2002] 68
3.3 Schéma des interactions et les mécanismes impliquer dans la théorie d'intoxication [Oman 2011] 72
3.4 Schémas explicatifs de la théorie d'instabilité posturale [Riccio et Stoffregen 1991] 73
3.5 Schéma des hypothétiques structures neurales impliquées dans le déclenchement des symptômes [Ernsting et al. 1999] 83
3.6 Influence de la fréquence sur l'incidence des cinétoses [O'Hanlon et M. E. McCauley 1974] 89
3.7 Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) version franco-canadienne du laboratoire de cyberpsychologie de l'UQO [Bouchard et al. 2007] 94
3.8 Exemple de mesure stabilométrique d'instabilité posturale [TechnoConcept 2007] 96

3.9 Design intérieur du concept-car autonome Renault EZ-ULTIMO (`https://group.renault.com/`) . . . 98
3.10 Exemple de lunettes à obturateur stroboscopique (`fouroux-sport-vision.com`) . . . 103
3.11 Les boarding glasses [*Boarding Glasses*] . . . 104
3.12 Exemple de la vue du nez virtuel dans le casque [Whittinghill et al. 2015] 104
3.13 Prototype de GVS pour expérimentations [Sra et al. 2019] . . . 106
3.14 Illustration du fonctionnement de la solution vMocion™ [*vMocion*] . . . 106
3.15 Bracelets élastique d'acupressure simple (`www.amazon.fr`) . . . 107
3.16 Bracelet d'acustimulation électrique ReliefBand [*Bracelet*] . . . 107

4.1 Axes véhicules normes ISO 8855-2011 . . . 111
4.2 Exemples de caissons infra-basses . . . 112
4.3 Exemples de systèmes vibrants pour la simulation de conduite . . . 112
4.4 Modèle humain de résonance « Sven Jr » de Sven-Olof Emanuelsson [Lucena et al. 2010] . . . 113
4.5 Effets des vibrations basses fréquences sur les cinétoses [O'Hanlon et M. E. McCauley 1974] . . . 115
4.6 Simulateur automobile dynamique SI^{2}M . . . 120
4.7 Logiciel de simulation de conduite SCANeR™ Studio . . . 121
4.8 Aperçu du scénario de conduite . . . 121
4.9 Plateforme vibratoire D-BOX® . . . 122
4.10 Densité spectrale de puissance du signal vibratoire mesuré . . . 123
4.11 Mesure du signal vibratoire restitué . . . 123
4.12 Mesure du balancement postural [TechnoConcept 2007] . . . 124
4.13 Déroulement de l'expérimentation pour un sujet . . . 126
4.14 Scores SSQ pour la configuration sans vibration . . . 127
4.15 Scores des symptômes de mal de simulateur . . . 128
4.16 Scores SSQ par sous-échelle . . . 129
4.17 Écarts d'aire du balancement postural pour la configuration sans vibrations 130
4.18 Écart d'aire du balancement postural pour chaque configuration . . . 130
4.19 Écart de largeur du spectre multifractal du balancement postural pour chaque configuration . . . 131

5.1 Latences importantes d'un simulateur de conduite . . . 138
5.2 Mesure des signaux de mouvements . . . 142
5.3 Configuration des capteurs et de la chaine d'acquisition . . . 143
5.4 Représentation des signaux reçus par la carte d'acquisition . . . 144
5.5 Mesure de la latence visuelle d'Ultimate . . . 145
5.6 Schéma d'implantation du module . . . 147
5.7 Aperçu de scénario de conduite . . . 147
5.8 Scores SSQ pour la conduite sans correction . . . 150
5.9 Scores SSQ par sous-échelle . . . 151
5.10 Préférences de configuration des sujets . . . 152

6.1 Illustration du réflexe vestibulo-oculaire . . . 158
6.2 L'arc à trois neurones impliqué dans le RVO (Wikibooks [*Système vestibulaire*]) . . . 159

6.3 Modélisation de la synergie RVO-ROC [D. A. Robinson 2011] 160
6.4 Exemples d'instrumentations de mesure du RVO (`www.medicalexpo.fr`) 161
6.5 Simulation de l'accélération par inclinaison de la cabine [COLOMBET et al. 2015] 166
6.6 Déclenchement inapproprié du RVO en simulation dynamique 167
6.7 Mesures d'inclinaison de la cabine avec les différents MCA pour un créneau d'accélération 169
6.8 Vue de la cabine lors de la simulation 170
6.9 Profil d'accélération du véhicule EGO 171
6.10 Lunettes d'eye-tracking Pupil Core de Pupil Labs [*Pupil Core*] 171
6.11 Participant avec les lunettes de mesure pendant la simulation 173
6.12 Déroulement de la mesure du RVO pour un participant 173
6.13 Exemple des données récoltées avec Pupil-Player 175
6.14 Exemple de mesure de l'angle de rotation de l'œil, isolée et filtrée. (En rouge le marquage du début de la rotation, en orange le signal mesuré et en bleu le signal filtré) 176
6.15 Exemples de mesures de la rotation de l'œil avec un RVO et un ROC marquants et facilement identifiable 176
6.16 Exemples de mesures inexploitables 177
6.17 Pourcentage de RVO non identifiable en fonction du MCA 178
6.18 Approximation de la latence du RVO en fonction du MCA 179
6.19 Mesure de l'angle de décalage dû au RVO 179
6.20 Mesure de la durée du décalage du regard 180

LISTE DES TABLEAUX

3.1 Facteurs pouvant influer le mal du simulateur [Kolasinski 1995] 84

4.1 Tableau des performances pour un vérin (D-Box [*Simulation*]) 119
4.2 Statistiques de la population testée 125
4.3 Résultats des tests de Wilcoxon pour les SSQ 129
4.4 Résultats des tests de Wilcoxon pour les mesures d'aire posturale 131
4.5 Résultats des tests de Wilcoxon pour les mesures du spectre multifractal 131
4.6 Moyenne du classement de préférence pour chaque configuration 132
4.7 Résultats des tests de Wilcoxon pour le classement des configurations . . 132

5.1 Tableau des latences de mouvement Ultimate 142
5.2 Résultat de la mesure de la latence visuelle d'Ultimate 145
5.3 Statistique de la population testée 148
5.4 Résultats des questionnaires 152

6.1 Statistiques de la population testée 174
6.2 Résultats des tests de corrélation de Pearson avec la vitesse de rotation . 180

LISTE DES ACRONYMES

ADAS advanced driver-assistance systems *: systèmes d'aides à la conduite avancés*

CAVE CAVE automatic virtual environement

CSC canaux semi-circulaires

DFOV display field of view *: champ de vision d'affichage*

DIL driver in the loop *: humain dans la boucle*

ECG électrocardiogramme

EEG encéphalogramme

EGG électrogastrogramme

EOG électrooculogramme

FOV field of view *: champ de vision*

GVS galvanic vestibular stimulation *: la stimulation vestibulaire galvanique*

HMD head mounted display *: visiocasque*

IR infra-rouge

IVB independent visual background *: le fond visuel indépendant*

MCA motion cueing algorithm*: algorithme de contrôle plateforme*

RGB red green blue *: codage des couleurs en rouge, vert, bleu*

ROC réflexe opto-cinétique

RVO réflexe vestibulo-oculaire

VIMS visually induced motion sickness *: les cinétoses visuellement induites*

VR virtual reality *: réalité virtuelle*

CHAPITRE 1

INTRODUCTION ET CONTEXTE

1.1 Avant-propos

Les travaux de la thèse « Réduction du mal du simulateur lors de la simulation longue durée pour la validation de véhicules autonomes » présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre d'un contrat CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) établi entre Renault et l'Institut Image (Arts et Métiers/LISPEN), au sein du laboratoire commun LiV (Laboratoire d'immersion Virtuelle). Ces travaux, principalement menés au Technocentre de Renault à Guyancourt, ont débuté en mai 2017. Ils se sont déroulés sous l'encadrement de Andras Kemeny, Professeur à Arts et Métiers et Expert-leader simulation immersive et réalité virtuelle chez Renault ; Florent Colombet, référent simulation de conduite chez Renault ; et Damien Paillot, enseignant-chercheur à l'Université de Bourgogne et à l'Institut Image.

Le but de cette thèse était de travailler sur une question de recherche bien connue dans le domaine de la simulation de conduite : le mal du simulateur. Ce mal, assez semblable au mal des transports, est apparu avec les premiers simulateurs de vol, aux alentours de 1910 avec le « tonneau Antoinette » [Rüttimann et Vautrin 2017]. Il présente des symptômes assez similaires, allant des simples nausées jusqu'aux vomissements, pouvant, entre autres, limiter le temps des scénarios de conduite en simulation. De plus, même s'il est généralement considéré comme un problème de confort dans le domaine des transports, il est handicapant dans le cas de la simulation de conduite, car il nuit aux performances et modifie le comportement des conducteurs.

Ces travaux s'inscrivent dans le contexte de la simulation de conduite driver in the loop et plus particulièrement du développement du véhicule autonome au sein du groupe Renault. En effet, la simulation de conduite est de plus en plus répandue dans le domaine automobile. Elle permet la réalisation de tests et la validation des différents systèmes des véhicules, comme les interfaces, l'ergonomie ou encore les aides à la conduite avancées (ADAS). En plus d'optimiser les prestations précédentes, ces travaux permettront

d'améliorer la simulation de conduite pour le développement du véhicule autonome, qui nécessite des scénarios de simulation plus longs.

Les résultats de ces recherches visent l'amélioration directe de la simulation de conduite au sein du groupe Renault, ainsi qu'a bénéficier à tous les acteurs du domaine en général. De plus, certains résultats pourront être exploités ou adaptés pour d'autres domaines, comme l'aviation (simulateurs de vol), voire la réalité virtuelle qui est sujette à un mal similaire.

1.2 Simulation pour la validation du véhicule autonome

1.2.1 Le véhicule autonome

Le véhicule autonome est un moyen de transport, souvent une voiture ou un camion, fonctionnant sans intervention humaine, pouvant circuler sur la voie publique dans toutes les situations de trafic. Il permet ainsi de libérer l'humain de la tâche de pilotage, afin de réduire la pénibilité et de permettre d'autres activités pendant ses déplacements. Sachant que 90 % des accidents de la route sont liés à des erreurs humaines (fatigue, inattention, alcool...), ces véhicules pourraient permettre d'éviter ces types d'accidents. La sécurité routière se verrait ainsi grandement améliorée, même si ces véhicules pourraient engendrer de nouveaux types d'accidents [W. Wachenfeld et Winner 2016 ; Winkle 2016] (cf. figure 1.1). Ainsi, en retirant le conducteur de la boucle, la mobilité personnelle automatisée a le potentiel d'être plus efficace, plus sûre et plus verte [T. Robinson et al. 2010].

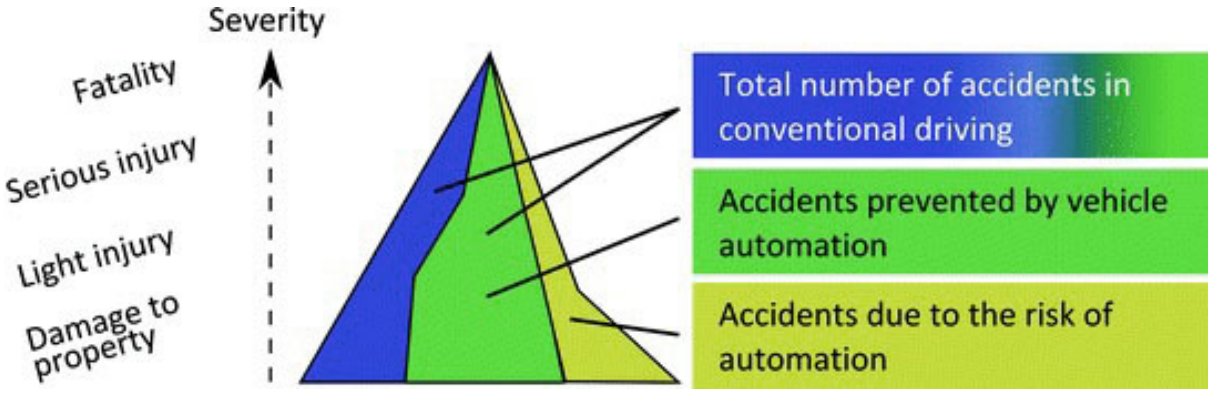


Figure 1.1 – Accidentologie théorique avec l'automatisation des véhicules [W. Wachenfeld et Winner 2016]

Le véhicule autonome a toujours été un fantasme de science-fiction, que ce soit dans la culture populaire, avec, par exemple, la voiture du film *I, robot*, ou bien dans l'esprit des constructeurs automobiles. Un de ces premiers concepts a été présenté dès 1939, par General Motors, lors de l'Exposition universelle de New York. L'attraction Futurama présentait alors une maquette de « la ville du futur » avec des autoroutes entièrement automatisées. En 1956, General Motors continue sur son idée et équipe son concept car, la Firebird II, d'un système de guidage par fil électrique dans la chaussée. Le premier véhicule autonome sur route fut développé au milieu des années 70 au Japon dans le laboratoire de robotique de Tsukuba. Ce véhicule était guidé grâce à de la reconnaissance visuelle et pouvait avancer jusqu'à 30 km/h, seul sur un circuit dédié [Tsugawa 1994].

Depuis, la technologie a bien évolué et, aujourd'hui, le véhicule autonome se rapproche davantage de la réalité que du rêve et de la fiction. En 2005, le DARPA [*The Grand Chal-*

lenge] a démontré que des voitures étaient capables d'être complètement autonomes sur de grandes distances (213 km). Puis, en 2007, il prouve qu'elles pouvaient aussi s'intégrer dans un trafic urbain tout en respectant le Code de la route. Actuellement, plusieurs acteurs travaillent sur des projets de véhicules autonomes, comme les constructeurs automobiles Tesla, Audi, Toyota, Peugeot, General Motors, Mercedes-Benz, et bien sûr, l'Alliance Renault-Nissan-Mitsubishi. Par ailleurs, d'autres acteurs importants, dont ce n'est pourtant pas le cœur de métier, cherchent à entrer dans la course, comme Google, Apple ou encore Uber. À l'heure actuelle, plusieurs prototypes sont déjà à l'essai à travers le monde, tel que le plus connu et emblématique : la Google Car. Actuellement appelée projet Waymo (cf. figure 1.2), il a débuté en 2010 et est autorisé à circuler sur la voie publique dans plusieurs états américains.

FIGURE 1.2 – Une des voitures autonomes Waymo circulant actuellement sur les routes américaines (`www.futura-sciences.com`)

Dans sa gamme de véhicules, le Groupe Renault propose déjà divers systèmes d'aide à la conduite, appelés ADAS (advanced driver-assistance systems). Ces systèmes d'aide à la conduite avancés agissent pour la plupart de manière autonome, sans intervention humaine et permettent d'améliorer grandement la sécurité. L'antiblocage des roues (ABS), la direction assistée ou encore le détecteur d'angle mort en sont des exemples. Dernièrement, des aides à la conduite de plus en plus évoluées s'intègrent dans les nouveaux véhicules et autonomisent davantage la conduite. Parmi ces innovations sont à citer : le stationnement automatique ou encore l'aide au maintien dans la file de circulation (LKA) combiné avec le régulateur de vitesse adaptatif (ACC), qui va maintenir le véhicule dans la voie ainsi que d'adapter sa vitesse à celle des usagers devant lui, libérant le conducteur d'une partie des tâches de conduite. Même si, dans un premier temps, ils ne font qu'apporter une assistance au conducteur qui reste le seul pilote, ces systèmes d'assistance servent aussi de socle aux futurs véhicules autonomes.

À l'horizon 2023, le groupe Renault devrait commencer la commercialisation de véhicules partiellement autonomes. À savoir, des véhicules qui permettent de déléguer tota-

lement la conduite dans des zones dédiées telles que les autoroutes. On dénombre actuellement six prototypes de Renault Espace autonomes en test sur les routes de France et d'Allemagne. Ces prototypes se sont d'ailleurs montrés capables de passer les péages sans aucune intervention. Par ailleurs, lors du salon de l'automobile de Francfort en 2018, le groupe Renault a présenté le projet EZ : des concepts de taxis autonomes (robot-taxis) qui constitueraient un autre axe de développement de cette technologie (cf. figure 1.3). Ces robot-taxis sont actuellement en test à Rouen avec un projet entre le groupe Renault et Transdev. Dans le cadre de ce projet, quatre Zoé (cf. figure 1.4) et une navette qui circulent de manière autonome dans un périmètre contrôlé ont été mis à la disposition de clients.

FIGURE 1.3 – Concept car de Robot-taxis Renault EZ-GO

FIGURE 1.4 – Renault Zoé autonome en test à Rouen

1.2.2 Les niveaux d'autonomies

Comme mentionné précédemment, il existe plusieurs niveaux d'automatisation pour un véhicule, allant des aides à la conduite avancées, à une autonomie partielle jusqu'à l'autonomie totale. Plusieurs grilles de classifications de ces niveaux d'autonomies existent, bien que la plupart des acteurs travaillant sur l'automatisation des véhicules se basent sur le classement SAE J3016™, mis au point en 2014 par SAE International. Ce classement est réparti suivant six niveaux (cf. figure 1.5) :

Ces niveaux sont séparés en deux catégories. La première catégorie (niveaux 0, 1 et 2) regroupe les aides à la conduite. Pour celles-ci, comme l'intitulé l'indique, ces systèmes viennent aider à la conduite, mais le conducteur reste cependant responsable de la tâche de conduite et doit superviser ces systèmes.

Le niveau 0 : Pas d'autonomie, peu d'assistance
La conduite est réalisée entièrement par le conducteur humain, celle-ci n'est assistée que par le biais de signaux ou d'interventions ponctuelles. Dans cette catégorie se trouvent toutes les aides visuelles, comme le manque d'essence ou l'avertisseur d'angles morts, mais aussi quelques aides à la conduite comme la direction assistée ou le correcteur électronique de trajectoire.

FIGURE 1.5 – SAE J3016™ : Niveaux d'automatisation des véhicules (`https://www.sae.org/`)

Le niveau 1 : Assistance à la conduite, eyes on / hands on
Le conducteur peut activer soit une assistance de contrôle longitudinal (accélération, vitesse et distances), soit de contrôle latéral (maintien dans la voie) mais il ne dispose pas des deux en même temps. Il va être ici question de la plupart des aides à la conduite avancées comme le régulateur de vitesse ou l'aide au maintien dans la file de circulation. Le conducteur humain exécute tous les autres aspects de la tâche dynamique de conduite et supervise la tâche réalisée en autonomie par la voiture.

Le niveau 2 : Automatisation partielle, eyes on / hands off
Le conducteur peut, dans certaines situations, déléguer au système le contrôle longitudinal et latéral du véhicule. Le véhicule peut se déplacer tout seul sur la voie, mais il n'a pas conscience de la totalité de son environnement. Le conducteur peut dans ce cas relever son pied de la pédale d'accélération et, parfois, les mains du volant. Toutefois, il est responsable de la supervision et doit rester attentif à l'environnement, il peut à tout moment reprendre le contrôle si nécessaire. Ce niveau d'automatisation concerne les systèmes comme le régulateur de vitesse adaptatif combiné au maintien dans la voie ou le stationnement automatique. C'est à ce niveau que se situent l'« Autopilot » de Tesla et certains ADAS proposés dans des modèles haut de gamme.

La deuxième catégorie (niveaux 3, 4 et 5) regroupe les niveaux de conduite autonome, pour lesquels le véhicule est en capacité de capter son environnement et donc d'agir en conséquence. Pour ces niveaux, l'humain n'est plus responsable de la tâche de conduite.

Le niveau 3 : Autonomie conditionnelle, eyes off / hands off
À ce niveau la voiture ne peut être mise en mode autonome que sous certaines conditions (sur autoroute par exemple) et le conducteur peut alors se consacrer à d'autres activités (loisir, travail, etc.). Il doit néanmoins, être en capacité de reprendre le contrôle du véhicule à tout moment si celui-ci sort de ses conditions d'autonomie (en cas de sortie de route ou arrivant sur une zone de travaux par exemple). C'est ce niveau d'autonomie que testent actuellement les six Renault Espace en Europe et qui devrait être déployé sur les véhicules personnels. À l'heure actuelle, le « AI Traffic Jam Pilot » de Audi se trouve à ce niveau. Il ne fonctionne que dans les bouchons sur autoroute, jusqu'à 60 km/h, mais il offre au conducteur, si la législation en vigueur l'autorise, l'opportunité de s'adonner à d'autres activités que la conduite.

Le niveau 4 : Autonomie élevée, eyes off / hands off / mind off
À compter de ce niveau, le véhicule est en autonomie totale et aucune assistance n'est requise de la part des passagers, bien que cela se limite à des conditions spécifiques, par exemple une zone géographique ou des conditions météorologiques. À ce stade, le véhicule peut être dépourvu d'un volant et de pédales, néanmoins ils peuvent être conservés pour permettre au conducteur de conduire en dehors des conditions d'autonomie. Ce niveau concerne les robot-taxis ou les navettes autonomes qui circulent dans un périmètre contrôlé. C'est le cas de la fonction « automated valet parking », qui, sur un parking, donne à la voiture la capacité de trouver une place et de s'y garer de manière autonome.

Le niveau 5 : Autonomie élevée complète, driverless
Ici, le véhicule est autonome à 100 %, il peut effectuer n'importe quel trajet, sans intervention humaine ni conditions spécifiques, de la petite route de campagne aux carrefours complexes des grandes métropoles. Tout élément nécessaire à la conduite pour un être humain peut alors être retiré, tel que les éléments de contrôle (le volant, les pédales, etc.) mais aussi les différents indicateurs et rétroviseurs. La conduite humaine devient alors une option de plaisir.

1.2.3 Le paradoxe de la validation

Les véhicules équipés de ces nouvelles technologies d'automatisation de la conduite devraient bientôt faire leur apparition sur le marché pour des services ou de la vente aux particuliers. Cependant, pour cela, il faut d'abord que ces technologies soient validées légalement et techniquement. Du point de vue légal, différents projets de loi sont en voie d'être mis en place pour permettre le déploiement de ces technologies sur différents pays. En France, par exemple, la loi d'orientation des mobilités adoptée en novembre 2019 vise, entre autres, à adapter la législation et le Code de la route aux véhicules autonomes pendant les deux années à venir. Néanmoins, quant à la validation technique, ces nouveaux types de véhicules devront garantir fiabilité et sécurité, tant vis-à-vis des systèmes et composants comme la sécurisation et l'anonymisation des données reçues et émises, l'intégration de systèmes avancés de détection d'intrusion automatiquement mis à jour, etc. Avant tout, la priorité reste la sécurité des personnes dans la circulation routière publique, avec pour ambition de la rendre bien plus sécuritaire qu'avec des conducteurs

humains. Cette prise en compte de l'amélioration de la sécurité constitue l'argument clé le plus souvent mis en avant par les constructeurs.

Par conséquent, la sécurité de cette nouvelle technologie sera comparée à celle des conducteurs humains assistés par des systèmes avancés d'aide à la conduite en se basant, par exemple, sur un indice comme le nombre moyen et la gravité des accidents par kilomètre. Les chiffres clés donnés par le rapport de l'ASFA [*Association des sociétés françaises d'autoroutes*], permettent obtenir un ordre de grandeur du niveau de validation : en 2018, il a été reporté 21,3 accidents corporels par milliard de kilomètres parcourus sur autoroutes, avec 1,4 accidents mortels (cf. figure 1.6). Par conséquent, pour valider statistiquement ce type de systèmes, il serait alors nécessaire d'effectuer quelques milliards de kilomètres de roulage par les systèmes [W. H. K. Wachenfeld 2017 ; Kalra et Paddock 2016]. Ainsi, Renault, qui veut valider un véhicule autonome 10 fois plus performant qu'un humain, se trouve donc face au besoin de valider 20 milliards de kilomètres de roulage pour chacun de ses futurs véhicules autonomes.

	2016	2017	2018
Nombre d'accidents corporels *Number of casualties*	1 834	2 073	2 148*
Taux par milliard de km parcourus *Rate per billion km travelled*	18,2	20,2	21,3 *
Dont accidents mortels *Fatal accidents*	147	150	140
Taux / *Rate*	1,5	1,5	1,4
Tués / *Deaths*	169	166	157
Taux / *Rate*	1,7	1,6	1,6

* Provisoires / *Provisional data*

Figure 1.6 – Chiffre clés des accidents sur autoroute en France, de l'ASFA [*Association des sociétés françaises d'autoroutes*]

Par ailleurs, rouler des milliards de kilomètres n'est pas suffisant : ces systèmes doivent, de plus, être confrontés au maximum de conditions de conduite possibles : différents trafics, environnements, états et types de routes, conditions météorologiques, réactions des autres automobilistes, etc. Au vu de la complexité et l'imprédictibilité des situations dans lesquelles ils devront opérer, une solution serait de tester les véhicules autonomes en conditions réelles, sur route en trafic réel. À l'inverse, des systèmes plus simples peuvent se contenter d'être testés en laboratoire ou sur pistes [Kaleto et al. 2001]. Cela n'est pas applicable au cas de ces véhicules devant valider plusieurs milliards de kilomètres. Il faudrait au minimum une dizaine d'années avant d'y parvenir, même en employant une flotte de plusieurs véhicules. En outre, cela supposerait d'obtenir l'autorisation de déployer sur les routes publiques des véhicules autonomes dont la sécurité n'a pas été garantie et risquer ainsi d'engendrer de potentiels accidents mortels. La combinaison des conditions de sécurité requise et le niveau de complexité de la situation constituent ce qui est appelé « the approval trap » [W. Wachenfeld et Winner 2015 ; W. Wachenfeld et Winner 2016] pour la validation du véhicule autonome. En effet, suivant les méthodes

de tests et de validation utilisées pour des véhicules conventionnels, il est économiquement impossible de valider de tels systèmes.

Néanmoins, plusieurs solutions ont été mises en place afin de surmonter cet « approval trap ». Premièrement, l'autorisation du déploiement de prototypes partiellement validés sur les routes publiques constitue une avancée notable. Ceux-ci nécessitent tout de même soit qu'un conducteur se trouve constamment derrière le volant à surveiller le véhicule pour reprendre la main en cas de problème (exemples : Renault, Uber), soit sur des parcours spécifiques et contrôlés avec des systèmes de mise en sécurité au moindre problème (arrêt sur bande d'arrêt d'urgence), comme la voiture Waymo. Tesla propose également une solution à cet écueil, commercialisant le système « autopilot » de niveau 2 où le conducteur reste responsable du véhicule. Ce système sert de premier palier vers leur véhicule autonome et permet de récupérer les données de roulage de leurs clients actuels. Cependant, lors du roulage, les véhicules sont rarement confrontés à des situations à risques ou complexes pour les systèmes. C'est pourquoi il est important d'identifier ces types de situation pour les tester sur pistes ou en simulation, évitant ainsi de rouler des kilomètres inutiles uniquement destinés à se confronter à ces situations particulières. Le projet allemand PEGASUS [*Project*] vise à établir des critères, des outils et des méthodes de qualité, ainsi que des scénarios et des situations pour l'approbation de fonctions de conduite hautement automatisées. L'objectif final est de constituer une base de données de scénarios communs ouverte aux collaborateurs. Pour finir, en plus de ces solutions, la simulation massive sur calculateur intensif (HPC High-Performance Computing) jouera un rôle majeur permettant ainsi de réaliser virtuellement la majeure partie de ces kilomètres.

1.2.4 La simulation pour la validation

La simulation devient donc incontournable pour la validation de systèmes de véhicules autonomes, étant donné que les tests en situation réelle sont trop couteux, trop longs et potentiellement dangereux. De plus, la simulation numérique permet d'immerger les prototypes virtuels de véhicules autonomes dans des environnements de trafic difficilement reproductibles, voire dangereux. C'est pourquoi le projet européen Enable S3 [*Project*] développe une solution, des méthodes et des normes afin de valider les systèmes de véhicule autonome à l'aide de la simulation numérique. Malgré tout, la simulation numérique pure ne peut à elle seule couvrir complètement la physique et les environnements en raison de ses limitations dans la modélisation et le calcul. C'est pourquoi les tests physiques doivent toujours être réalisés afin de compléter et confirmer la simulation numérique, en garantissant leurs comportements dans les conditions réelles. De son côté, la simulation numérique doit, quant à elle, être au plus près des résultats des tests physiques. C'est pourquoi la validation des véhicules autonomes nécessite la combinaison de ces deux types de simulation (cf. Groupe Renault [*Simulation physique et virtuelle*]).

Pour cela, une méthodologie similaire suivante peut être appliquée (cf. figure 1.7). Pour commencer, l'ensemble des scénarios critiques vont être identifiés au travers des études d'accidentologie ou de projets (cf. PEGASUS). Une fois ces scénarios identifiés,

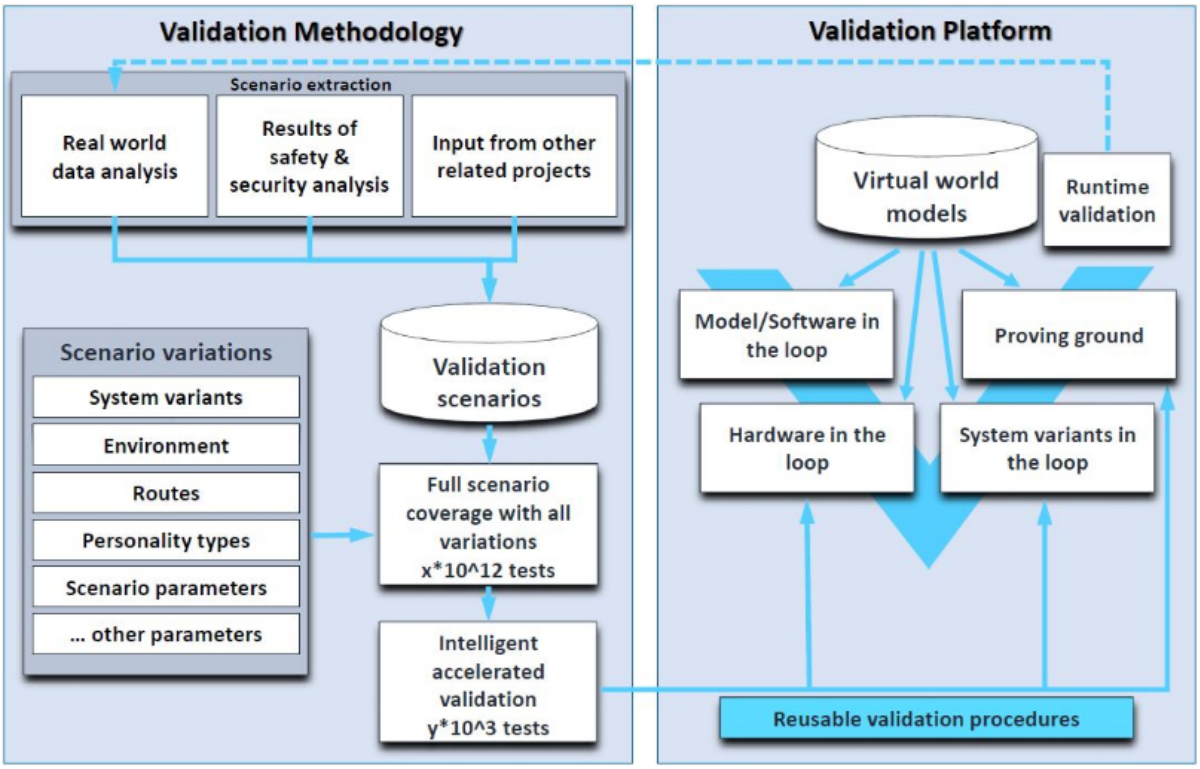


FIGURE 1.7 – Exemple de méthodologie de validation physique/numérique (ENABLE S3 [*Project*])

ceux-ci vont être transformés en scénarios de simulation en y ajoutant différentes variables comme la vitesse des véhicules, leur type, la route, etc. C'est grâce à cet ensemble conséquent de scénarios qu'il sera ensuite possible de simuler les algorithmes embarqués, le comportement des capteurs ou d'autres éléments. Les tests physiques ne se feront alors que pour de la validation ou les scénarios les plus critiques. À la suite de l'extraction des données de simulation, il en ressort de nouveaux scénarios, soit inexplorés, soit trop peu satisfaisants, qui seront alors réinjectés dans les tests. De plus, grâce aux véhicules prototype en test sur les routes réelles, de nouvelles données seront collectées, tels que les moments où le système s'est trouvé en situation d'échec. Cette extraction de nouvelles données pourra ainsi être resimulée en scénarios virtuels, afin de les valider intégralement en y ajoutant des variations.

Cependant, pour l'instant, le véhicule complètement autonome, de niveau 5, reste encore un rêve et il faudra sans doute attendre encore quelques décennies avant de voir ce type de véhicules sur les routes. C'est pourquoi les constructeurs automobiles se tournent à l'heure actuelle vers la commercialisation de véhicules de niveaux 3 ou 4. Cela implique tout de même la nécessité d'un conducteur humain derrière le volant, excepté pour le cas des robot-taxis/navettes autonomes. Pour le moment, l'humain est toujours indispensable, ou du moins pour certaines portions de route ou en cas de situation insoluble pour le véhicule autonome où le conducteur doit reprendre le contrôle. Il faut donc aussi pouvoir tester et simuler ces phases de conduite partagée, comme le transfert de la conduite au véhicule ou la reprise en main par le conducteur. Ces phases peuvent être très critiques pour le conducteur, surtout lors de la phase de reprise de conduite qui doit pouvoir se

faire en quelques secondes lorsque le véhicule autonome est en difficulté. Toutefois, le comportement et les réactions humaines sont relativement dures à prévoir et simuler. C'est pourquoi, dans les phases de développement et de validation, la simulation avec le conducteur dans la boucle est impérative. De surcroit, la plupart des individus sont assez réticents à l'idée de confier la conduite à un automate, même si celui-ci est plus performant qu'eux. La représentation cognitive et affective du rôle et de la responsabilité du conducteur est très présente. Par conséquent, lors de la conduite autonome, les émotions associées telles que l'impuissance, la peur et le refus sont de puissants facteurs qui altèrent les comportements des conducteurs humains [Wolf 2016]. Cela renforce d'autant plus la nécessité de préparer, simuler et valider avec l'humain dans la boucle afin de prévoir au mieux ces cas complexes de réactions.

Figure 1.8 – Exemple de simulation driver in the loop

C'est pourquoi la simulation driver in the loop (DIL), qui consiste à immerger un conducteur humain dans une simulation d'un scénario de conduite, va être indispensable. Cette immersion peut se faire grâce à des simulateurs de conduite plus ou moins réalistes, allant du simple écran avec un volant et des pédales jusqu'à des simulateurs dynamiques complets (cf. figure 1.8). Ces simulateurs présentent l'avantage d'être moins risqués pour le conducteur que des tests physiques, tout en permettant une grande capacité de contrôle sur l'environnement et les scénarios, ainsi qu'une répétabilité permettant des campagnes de tests avec plusieurs participants. Les simulateurs de conduite ont aussi l'avantage d'être plus disponibles et moins chers, et ce tout en étant accessibles à tout conducteur contrairement aux essais sur pistes qui peuvent nécessiter une formation avec un permis spécial. En raison des avantages cités précédemment, ces simulateurs se sont amplement répandus chez les constructeurs automobiles et ont largement participé à la validation des ADAS. Ils se sont aussi répandus dans les instituts de recherche ou les universités en

raison de leur qualité en tant qu'un outil indispensable pour les études menées sur le comportement des conducteurs. En effet, l'analyse du comportement à travers le simulateur permet de comprendre comment le conducteur gère son interaction avec l'environnement et le véhicule ainsi que ses prises de décision.

Néanmoins, l'utilisation de la simulation DIL est actuellement partiellement contrainte par un de ses effets secondaires : le mal du simulateur. En effet, les simulateurs de conduite peuvent rendre les conducteurs malades de manière similaire au mal des transports ou comparable au mal de la réalité virtuelle. Cette affection peut toucher tous les conducteurs (sauf en cas système vestibulaire défectueux), et ce plus ou moins gravement (nausées, étourdissements, etc.), pouvant altérer leurs comportements et même aller jusqu'aux vomissements. Ces effets vont ainsi limiter le temps de scénario (en général inférieur à 20 min) ainsi que réduire l'acceptation des conducteurs. Or, dans le cadre de la validation du véhicule autonome, il est nécessaire d'avoir des simulations longues. Cette durée est requise pour permettre, par exemple, la perte ou le changement d'attention des conducteurs lors des phases de conduites en mode autonome afin d'observer les réactions lors de la reprise de contrôle. Ce phénomène, en plus de limiter le cadre d'utilisation des simulateurs de conduite, est également un point crucial pour le développement des futurs projets de Renault ainsi que du secteur automobile.

1.3 Méthodologie de travail

1.3.1 Objectifs et problématique

Comme énoncé précédemment, il est essentiel pour le groupe Renault d'améliorer ses performances en simulation de conduite driver in the loop et, plus particulièrement, dans l'optique de la validation du véhicule autonome. Cependant, un des verrous majeurs à cette amélioration réside dans la réduction du mal du simulateur pour permettre des simulations plus longues, nécessaires à cette validation. C'est pourquoi, à travers cette thèse, nous allons étudier des pistes de compréhension de ce phénomène et tâcher de trouver des solutions de réduction du mal du simulateur adaptées aux simulateurs Renault et aux contextes de leurs utilisations métier.

Dans le cadre de cette thèse « Réduction du mal du simulateur lors de la simulation longue durée pour la validation de véhicules autonomes », nous allons donc approfondir les questions suivantes :

1. Qu'est-ce que le mal du simulateur ? Quelles sont ses implications sur la tâche de conduite simulée ?
2. Quels sont les facteurs affectant l'incidence du mal du simulateur ? Lesquels entrent en adéquation avec les besoins de la simulation de conduite chez Renault ?
3. Dans quelle mesure des modifications peuvent-elles réduire l'incidence du mal du simulateur ?

1.3.2 Plan de lecture

Lors de nos travaux de thèse, nous avons réalisé un état de l'art sur les sujets concernés ce qui nous a mené à réaliser trois études expérimentales dans l'objectif de répondre à ces questions. Ces travaux seront présentés dans ce manuscrit en six grands chapitres, dont les trois premiers seront à dominante théorique, suivi de trois chapitres portés sur nos expérimentations.

Ce premier chapitre s'applique à introduire et présenter le sujet avec son contexte et les problématiques qui en émergent, ainsi que la méthodologie adoptée pour les besoins de ces travaux.

Le second chapitre sera, quant à lui, consacré à la perception humaine du mouvement dans les simulateurs de conduite. La perception du mouvement est un sens important pour la simulation de conduite et se trouve à l'origine du déclenchement du mal du simulateur.

Le troisième chapitre présentera la synthèse de l'état de l'art qui a été mené dans le but de mieux appréhender le mal du simulateur avec les différentes théories existantes

ainsi ses mécanismes intrinsèques. Cette approche visera à identifier les différents facteurs influençant le mal du simulateur ainsi que ses effets sur le conducteur.

Ensuite, **le quatrième chapitre** débutera la partie plus expérimentale, où sera exploré l'effet d'ajout de modalités vibratoires sur le corps lors de la simulation de conduite dans le but de réduire les conflits sensoriels.

Le cinquième chapitre se concentrera sur l'amélioration des stimulus de la simulation de conduite dans le cas du simulateur Renault Ultimate par la correction des latences afin de permettre une synchronisation visuel/vestibulaire.

Le sixième chapitre, et le dernier portant sur nos expérimentation, s'intéressera au potentiel déclenchement de mécanismes oculaire lors de la simulation de conduite dynamique, facteur potentiel du mal du simulateur et d'oscillopsies.

Pour finir, cette thèse s'achèvera sur **une conclusion générale** visant à synthétiser les résultats et les apports, tant théoriques que méthodologiques, auxquels ce travail de recherche aura permis d'aboutir.

1.4 Contexte de travail

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'un doctorat CIFRE établi entre Renault et l'Institut Image (Arts et Métiers/LISPEN), au sein du laboratoire commun LiV. Ces travaux ont été principalement menés au Technocentre de Renault à Guyancourt, au sein du service DEA-TDV, en charge de la simulation de conduite DIL.

1.4.1 Centre de simulation Renault

Fondé en 2002, le centre technique de simulation Renault a investi dans les nouvelles technologies du virtuel dès ses prémisses afin de fournir des outils performants à l'ingénierie. Ce centre compte actuellement plusieurs simulateurs de conduite et outils de réalité virtuelle afin de fournir les outils les plus performants pour la validation des systèmes automobile. Le but poursuivi est ainsi de permettre la réduction des couts, en diminuant le nombre de prototypes physiques et de raccourcir les temps de développements et de validations.

Pour ce faire, le centre de simulation dispose, entres autres, de plusieurs outils de réalité virtuelle comme des casques ou des salles immersives CAVE (CAVE automatic virtual environement) (exemple figure 1.9a). Ces outils de réalité virtuelle permettent de visualiser les maquettes numériques des projets véhicule notamment pour les revues de projet, de design ou d'ergonomie. Le centre dispose aussi de nombreux simulateurs de conduite, allant du simple siège avec écrans et commandes, en passant par un simulateur d'éclairage, ou encore un véhicule complet monté sur vérins devant un écran hémicylindrique haute résolution (cf. figure 1.9b), jusqu'au simulateur dynamique haute performance ULTIMATE.

(a) IRIS : CAVE à 5 faces très haute définition

(b) Hélios : Simulateur d'éclairage ultraréaliste

FIGURE 1.9 – Quelques simulateurs automobile du centre de simulation Renault

Le simulateur ULTIMATE (cf. figure 1.10) a été développé et construit de 2001 à 2004 dans le cadre d'un projet Européen (Eureka). Il s'agit d'un simulateur dynamique haute performance à 8 degrés de liberté à la pointe des technologies de l'époque. Il était composé d'un cockpit d'avant de voiture faisant face à un écran semi-cylindrique offrant un champ de vision latéral de 210°. Ce cockpit est monté sur une plateforme 6 axes de « Gough-Stewart », permettant les rotations suivant les trois axes ainsi que les trois translations de faible envergure. Cet ensemble est monté sur un double système de rails perpendiculaires permettant des mouvements latéraux et longitudinaux plus amples (6 m × 6 m) pour les restitutions d'accélérations ou de changements de voie, par exemple. Cet ensemble est supervisé par plusieurs ordinateurs afin de simuler les comportements du véhicule virtuel, calculer les trajectoires de la cabine, calculer les rendus graphique et sonores, etc. L'ensemble du scénario est géré par SCANeR™ Studio, logiciel de AVSimulation, largement répandu chez Renault pour les simulations automobiles.
Ce simulateur a depuis subi quelques évolutions afin de s'adapter aux nouveaux besoins des différents services de Renault, notamment le remplacement du cockpit par une Twingo 2 adaptée et l'amélioration du système de projection.

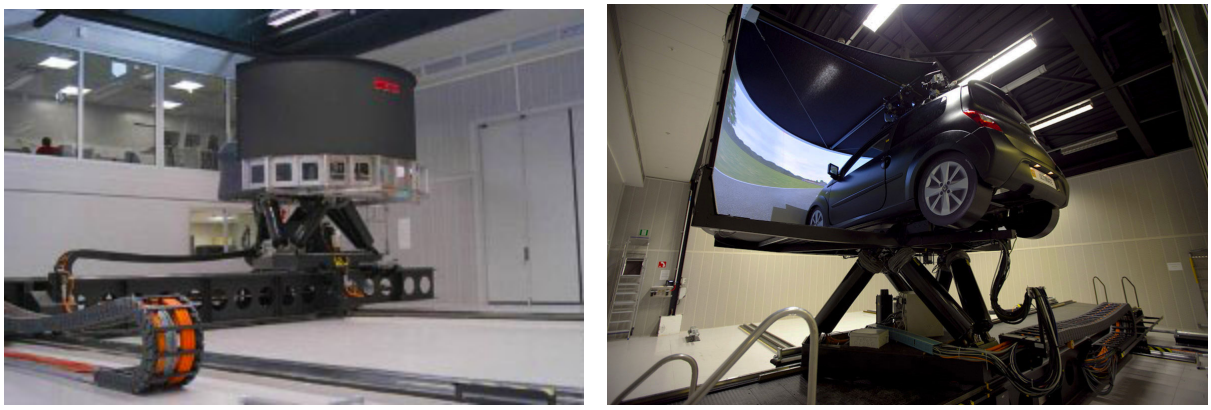


FIGURE 1.10 – Le simulateur dynamique haute performance ULTIMATE

Actuellement en expansion, notamment du à la demande pour la validation du véhicule autonome, le centre de simulation s'agrandi et construit actuellement un nouveau

simulateur dynamique haute performance à la pointe de la technologie (cf. figure1.11). Ce simulateur, ROADS (Renault Optimization Autonomous Driving Simulator), sera l'un des simulateurs les plus performants au monde. Constitué d'un dôme de projection à 360° pouvant accueillir des véhicules entiers. Il est de plus équipé d'un système de rails de 15 m par 15 m pouvant générer des accélérations jusqu'à $10\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ (cf. Groupe Renault [*ROADS*]).

Figure 1.11 – Vue d'artiste du futur simulateur ROADS

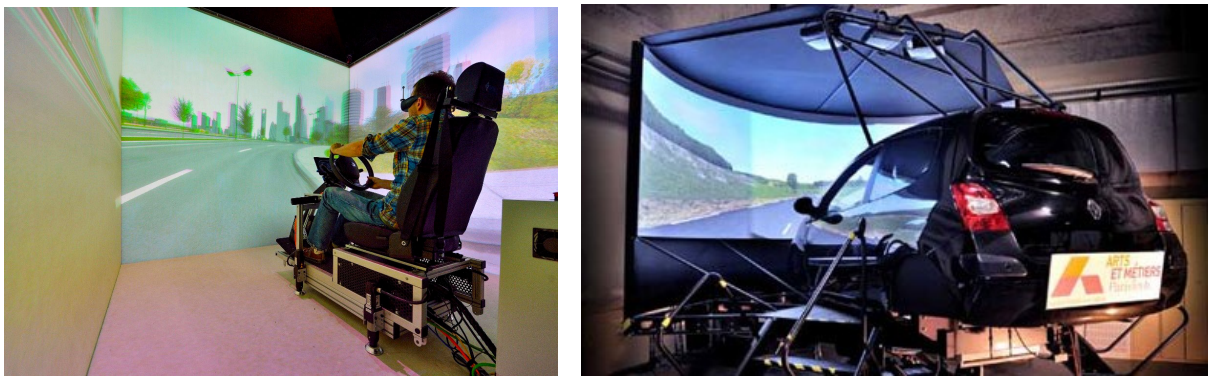
1.4.2 Institut image

L'Institut Image est un institut de recherche spécialisé dans le développement de méthodes et outils de l'immersion virtuelle au service de l'ingénieur. Il est rattaché à l'école Arts et Métiers intégré au Campus de Cluny et à l'une des équipes du Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques et Numériques (LISPEN). Fondé en 1997 à Chalon-sur-Saône, dans le berceau de la photographie, le laboratoire est un des acteurs majeurs de la recherche en immersion virtuelle et dispose de l'un des plus grands plateaux techniques dans le domaine ($410\,\mathrm{m}^2$). L'institut Image explore, entre autres, des problématiques industrielles, les amenant à créer un laboratoire commun avec Renault ainsi que des simulateurs de conduite.

En plus des différents dispositifs d'immersion virtuelle dont des CAVE, le plateau du laboratoire accueil différents simulateurs de conduite automobile. Parmi eux, le simulateur SI2M (cf. figure1.12a) composé d'un poste de conduite monté sur vérins électriques lui accordant 3 degrés de liberté de mouvements, avec restitution vibratoire. Ce simulateur peut être opéré dans un CAVE ou avec un casque immersif de réalité virtuelle.

L'institut dispose également d'un simulateur dynamique haute performance à 6 degrés

de liberté : SAAM (Simulateur de conduite Automobile Arts et Métiers) (cf. figure1.12b). Ce simulateur est constitué véhicule Renault Twingo 2 monté sur plateforme à 6 axes avec un système visualisation sur écran hémicylindrique (angle de champ 150°), assisté par un ordinateur utilisant aussi le logiciel SCANeR™ Studio 1.8.



(a) Le simulateur SI2M dans un CAVE (b) Le simulateur haute performance SAAM

FIGURE 1.12 – Quelques simulateurs automobiles de l'institut Image

1.4.3 LiV

L'association de Renault à l'Institut Image, sous forme d'un laboratoire commun, le LiV (Laboratoire d'immersion Virtuelle), a permis de faciliter la recherche au sein de l'entreprise et d'avoir accès à des outils expérimentaux. De cette association sont nés de nombreux projets de recherche et notamment plusieurs thèses CIFRE, comme c'est le cas de celle-ci.

CHAPITRE 2

PERCEPTION DU MOUVEMENT EN SIMULATEUR

Le mal du simulateur trouvant son origine dans notre appréhension du monde, il nous faut d'abord mieux comprendre la perception humaine. Cela nous permettra, de plus, d'appréhender la capacité des simulateurs à tromper ces sens. Nous allons ici nous intéresser plus particulièrement à notre perception de la vitesse et des accélérations qui jouent un rôle majeur dans la simulation de conduite ainsi que dans l'apparition du mal du simulateur. Il s'agira, ensuite, d'étudier la simulation de ces sens par les simulateurs de conduite, ainsi que leurs limites et défauts.

2.1 Sensorialité humaine et perception du mouvement

Dans le but de percevoir et contrôler les mouvements d'un véhicule, le cerveau assimile plusieurs informations sensorielles provenant de différents capteurs stimulés par le mouvement. En premier lieu, le système visuel va fournir des informations sur la position et le déplacement des objets environnants, mais également sur le mouvement propre [1]. En second lieu, le système vestibulaire, véritable centrale inertielle, va fournir des informations sur les accélérations et les rotations. De surcroit, d'autres systèmes perceptuels comme l'audition ou la somesthésie, peuvent avoir un rôle moindre dans la perception du mouvement.

1. Mouvement propre ou egomotion est le déplacement de l'observateur dans l'environnement.

2.1.1 Système visuel

La vision est le sens physiologique le plus important chez l'être humain : environ la moitié du cortex cérébral est consacrée à l'analyse du monde visuel [Bear et al. 2002]. Ce sens est essentiel pour évoluer dans l'espace, et particulièrement dans le cas de la conduite. Il permet, entre autres, l'identification des objets ainsi que l'appréciation de leur position et vitesse dans l'espace.

Anatomie général de l'œil

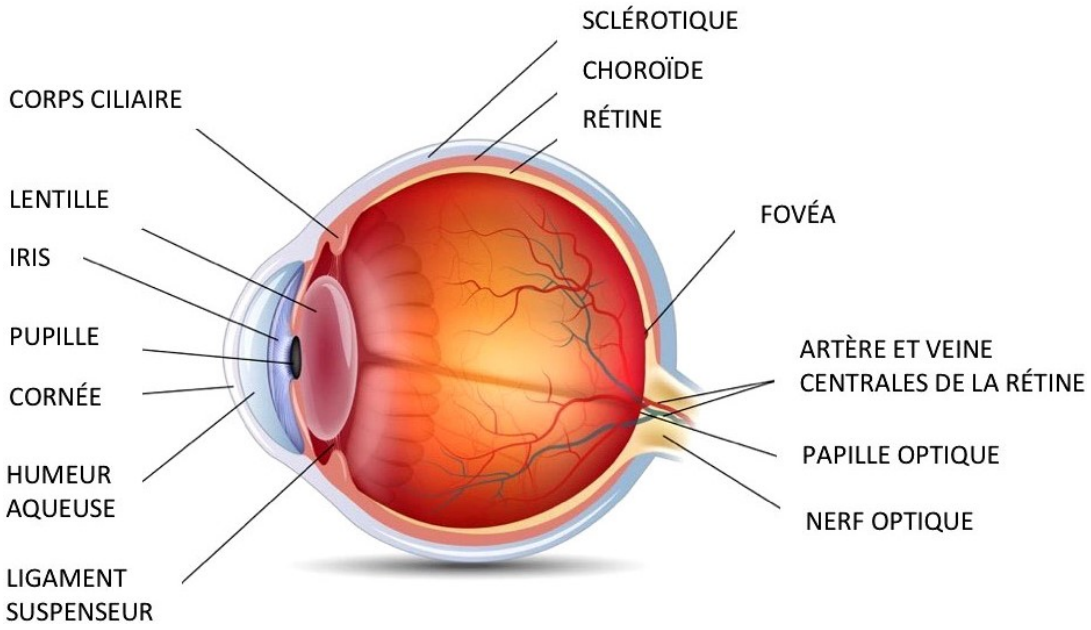


Figure 2.1 – Représentation schématique d'une coupe transversale de l'œil (`www.provisu.ch`)

L'organe visuel étant en majorité caché, une vue en coupe permet de mettre en évidence sa composition (figure 2.1). La lumière va d'abord traverser la cornée, un tissu transparent qui va transmettre la lumière au cristallin. Étant l'interface avec l'extérieur et afin de préserver la netteté et la propreté de sa surface, la cornée est recouverte d'une fine couche de larmes entretenue régulièrement par le clignement des paupières. Avant d'atteindre le cristallin, la lumière va passer par l'iris, une membrane perforée en son centre par la pupille. Celle-ci donne sa couleur à l'œil et sa contraction ou la dilatation permet de réguler la quantité de lumière transmise. Le cristallin, qui agit comme une lentille biconvexe, va faire converger les rayons lumineux sur la rétine, paroi sensible à l'intérieur de l'œil. Pendant son trajet, la lumière va traverser deux milieux transparents (humeurs aqueuse et vitrée), dont la principale fonction est de produire la pression nécessaire afin de maintenir la forme de l'œil. Cette forme est principalement maintenue par son enveloppe extérieure, la sclérotique, plus communément appelée blanc de l'œil. La rétine, qui tapisse l'intérieur de l'œil, est la dernière destination de la lumière. Cette dernière

va transducter [2] les signaux lumineux en influx nerveux grâce à environ 125 millions de photorécepteurs. Ces signaux vont ensuite transiter par le nerf optique jusqu'au cerveau. Tout cet ensemble, qui forme le globe oculaire, est maintenu et mis en mouvement au sein de la cavité osseuse de l'orbite par 6 muscles oculomoteurs fixés à la sclérotique.

Le comportement de l'œil est souvent comparé à celui d'un appareil photo. En effet, la rétine est facilement assimilable à une pellicule ou un capteur photographique CCD d'un appareil numérique. De plus, l'œil dispose aussi d'une capacité de mise au point, l'accommodation, qui permet d'avoir une image nette quelle que soit la distance de l'objet regardé. Celle-ci se réalise par la déformation du cristallin grâce aux muscles et ligaments ciliaires. La contraction ou le relâchement de ces muscles va étirer ou bomber le cristallin, cela entrainera le changement de la convergence de celui-ci.

Description de la rétine

En examinant l'intérieur de l'œil, grâce à un examen ophtalmoscopique, on peut observer plus en détails la rétine (Figure 2.2). Celle-ci est largement irriguée par des vaisseaux sanguins qui partent tous de la zone appelée disque optique. Aussi nommée papille optique, c'est également à l'arrière de cette zone qu'est fixé le nerf optique ainsi que son lien à la rétine. Par ailleurs, en raison de la complexité de la zone ainsi que des nombreux vaisseaux sanguins qui bloquent la lumière, cette zone est dite aveugle et ne dispose, par conséquent, d'aucun photorécepteur. Le cerveau doit donc constamment compenser le manque d'informations visuelles de ce point aveugle dans la vision.

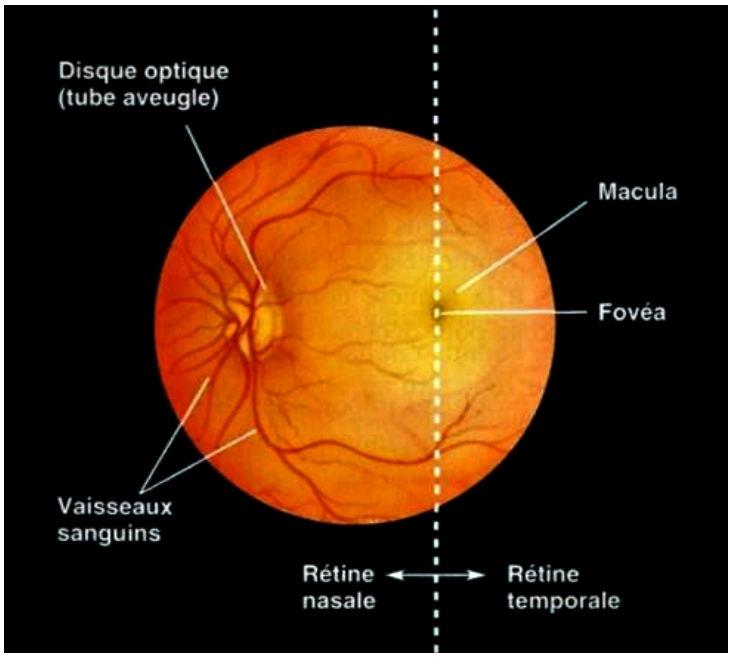


FIGURE 2.2 – Représentation schématique d'une coupe transversale de l'œil [BEAR et al. 2002]

2. La transduction est l'action d'une cellule à convertir un signal en un autre.

À l'inverse, au centre de la vision, on peut observer une zone considérablement moins chargée en gros vaisseaux sanguins : la macula. L'absence de ces gros vaisseaux sanguins, capables de bloquer la lumière, va ainsi permettre une meilleure vision centrale que périphérique. Au centre de la macula, on peut observer une tâche noire, la fovéa, zone où la rétine est la plus fine. Cette région est géométriquement située à l'exact opposé de la pupille et est donc responsable de la vision centrale, vision la plus détaillée.

Afin de traiter les signaux lumineux, la rétine est structurée suivant trois couches principales, observable avec une vue en coupe de celle-ci (Figure 2.3). Dans l'ordre, depuis la surface (en contact de l'humeur vitreuse) jusqu'au plus profond, se trouvent : la couche ganglionnaire, la couche nucléaire et finalement les photorécepteurs.

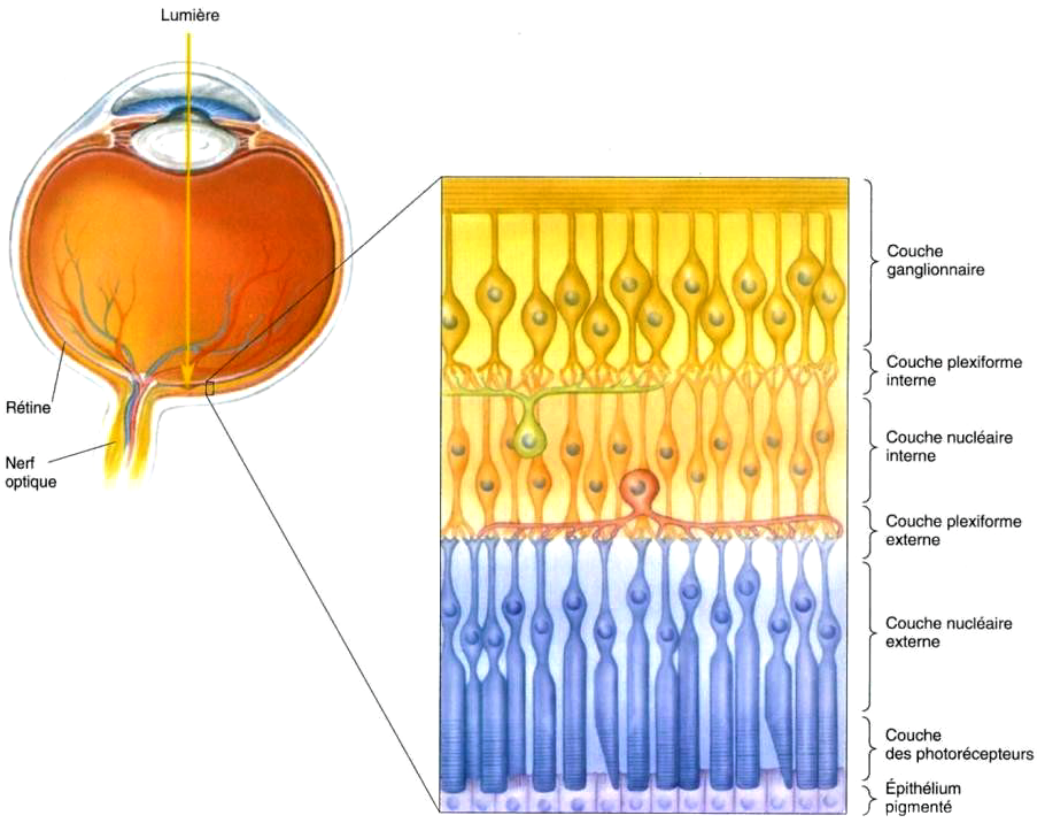


FIGURE 2.3 – Représentation schématique d'une section de la rétine et de ces différentes couches cellulaires [BEAR et al. 2002]

Les photorécepteurs, comme leurs noms l'indiquent, sont les cellules sensibles à la lumière. Bien qu'étant les cellules les plus profondes de la rétine, elles sont les premières à recevoir les stimulus lumineux. En effet, la lumière va traverser les précédentes couches de la rétine, insensibles à la lumière, avant de parvenir aux photorécepteurs. L'information visuelle des photorécepteurs est transmise aux cellules bipolaires de la couche nucléaire interne, pour ensuite être transmisse aux neurones de la couche ganglionnaire. Les axones de ces dernières se rejoignent au niveau du point aveugle pour former ensuite le nerf optique.

Les deux premières couches internes de la rétine vont permettre d'effectuer un premier

traitement neuronal de l'information fournie par les photorécepteurs. En effet, en plus de transiter directement entre les couches de la rétine, l'information peut également transiter transversalement à l'aide des deux couches plexiformes (interne et externe). Au moyen de couches de moins en moins denses, la transmission suit une progression depuis un traitement très local des caractéristiques élémentaires du signal, jusqu'à une représentation intégrée plus globale. En effet, les cellules ganglionnaires sont en moins grand nombre que les cellules bipolaires, elles-mêmes moins nombreuses que les photorécepteurs.

Comme vu précédemment, les photorécepteurs qui tapissent le fond de la rétine sont à l'origine de la transduction du signal lumineux en influx nerveux. Ceux-ci sont au nombre d'environ 125 millions pour l'être humain et se décomposent en deux types en fonction de leurs formes et de leurs rôles : les bâtonnets et les cônes. Les premiers, qui sont majoritaires (environ 24 fois plus) et que l'on trouve exclusivement en région périphérique de la rétine (cf. figure 2.4), détectent plutôt le mouvement et les faibles intensités lumineuses. En effet, les bâtonnets sont environ 1000 fois plus sensibles à la lumière et vont plutôt être utiles en vision scotopique (de nuit) et mésopique (crépusculaire). En revanche, les cônes sont quant à eux en plus petit nombre (environ 5 millions) et majoritairement situés dans la région maculaire, notamment dans la fovéa (cf. figure 2.4). Ces photorécepteurs, particulièrement utiles en vision photopique (ou diurne) car moins sensibles à la luminosité, vont aussi être sensibles au détail, à la texture et à la couleur. En effet, contrairement aux bâtonnets qui ont tous le même photopigment, les cônes peuvent se classer en trois sous-catégories en fonction des longueurs d'onde auxquelles ils sont le plus sensibles.

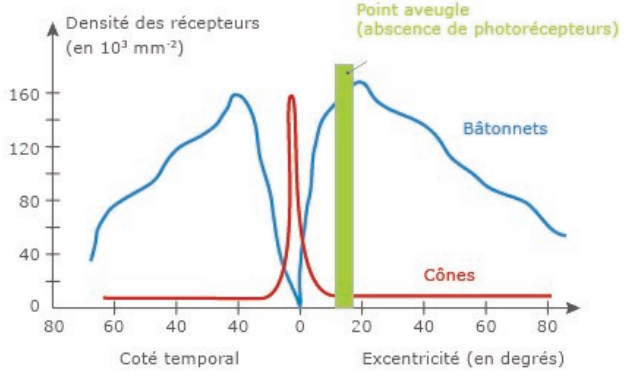


FIGURE 2.4 – Répartition radiale des photorécepteurs, passant par la fovéa et le point aveugle (`www.maxicours.com`)

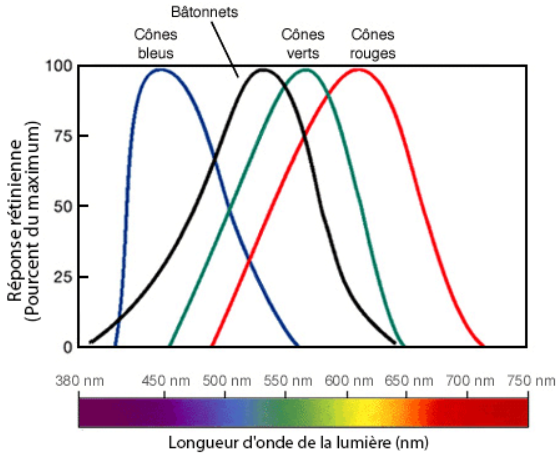


FIGURE 2.5 – Courbe d'absorbance des cônes et bâtonnets chez l'homme

En addition aux photorécepteurs, les cellules ganglionnaires ont également un rôle important dans le traitement des signaux lumineux, car elles répondent différemment selon la dimension spatiale et temporelle du signal. Leur fonction est, par conséquent, essentielle pour déterminer la nature de l'information transmise au cerveau. Suite à des études menées sur des primates [KAPLAN et BENARDETE 2001], ces dernières peuvent également être classées en trois types en fonction de leur taille ainsi que de leurs caractéristiques de réponse :

- Les cellules de type P (pour *parvus*, petit en latin) : Représentant 90 % des cellules

ganglionnaires, elles sont principalement réparties au centre de la rétine. Elles ont une réponse de type tonique, c'est-à-dire qu'elle est maintenue aussi longtemps que le stimulus agit. Elles sont donc impliquées dans l'analyse des aspects spatiaux des stimulus, comme la forme ou les détails.

- Les cellules de type M (pour magnus, grand en latin) : Plus grosses, elles ne représentent cependant que 5 % des cellules totales et sont majoritairement situées en périphérie de la rétine. Elles ont une réponse de type phasique, c'est-à-dire répondant par une brève impulsion de potentiels d'actions. Elles sont donc impliquées dans l'analyse des aspects temporels des stimulus et, plus particulièrement, pour la détection des mouvements.
- Et finalement, les cellules de type K (ou non-M et non-P) : Elles forment les 5 % restants. Cependant, les spécificités de ces dernières ne sont pas encore très bien caractérisées, pouvant avoir des réponses phasiques et toniques.

Champ de vision

L'étude du fonctionnement général de l'œil permet de mieux comprendre et ainsi de caractériser la vision humaine (figure 2.6). À ce titre, le champ de vision correspond à la portion de l'espace vue par les yeux sans bouger la tête, mais avec les yeux mobiles.

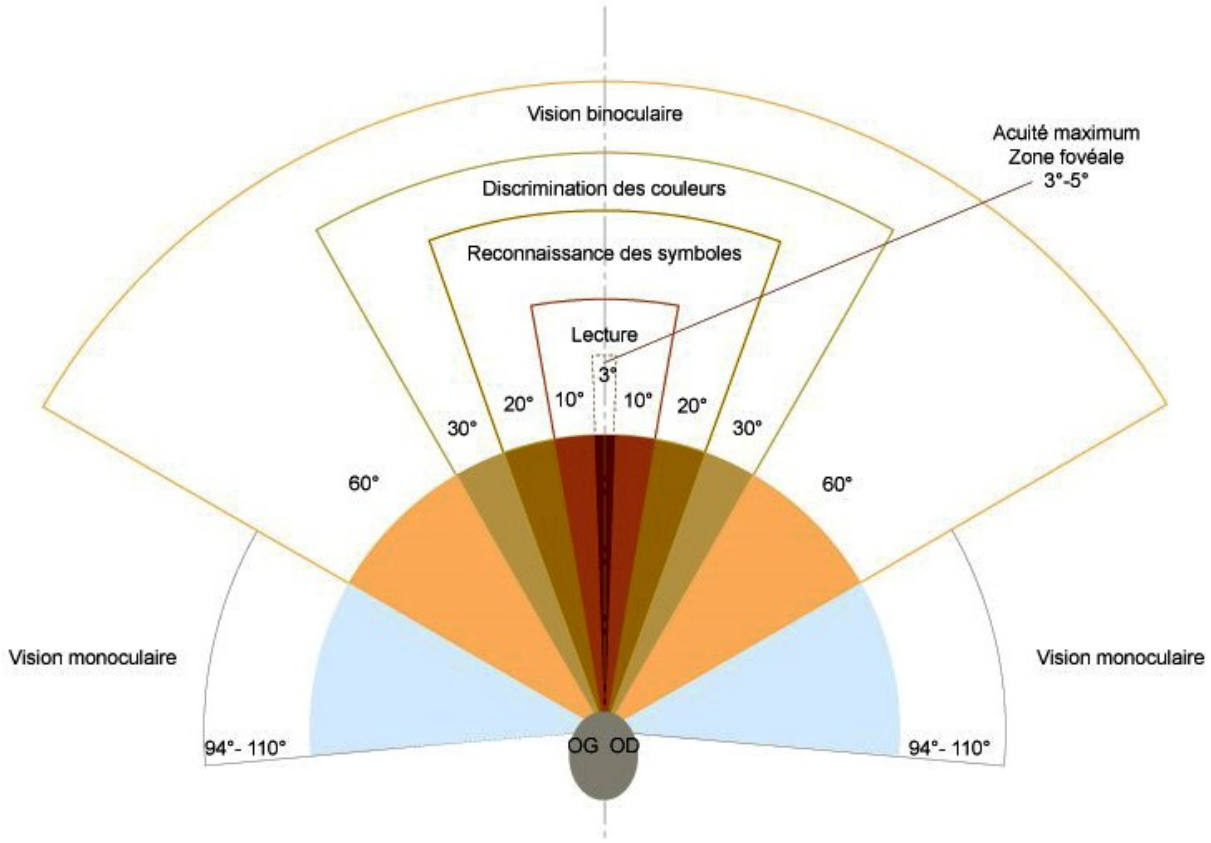


FIGURE 2.6 – Le champ de vision humain et sa décomposition (`fr.wikipedia.org`)

L'être humain ayant deux yeux, son champ de vision peut aisément être divisé en deux visions différentes : le champ de vision binoculaire, partie qui peut être couverte par les deux yeux simultanément et, à l'inverse, le champ de vision monoculaire, partie qui ne peut être couverte que par un seul œil. Le champ de vision binoculaire humain est relativement large, car les yeux sont situés sur l'avant de la tête contrairement à d'autres animaux. Grâce à cette configuration du système visuel, la vision binoculaire a la particularité de permettre l'estimation de la distance aux objets observés. À l'inverse, la partie étant couverte par la vision monoculaire étant en plus une vision périphérique, celle-ci ne percevra pas les couleurs mais sera plus sensible aux mouvements.

Le champ binoculaire peut ensuite être divisé en champs de plus en plus petits à mesure que l'on se rapproche de la zone fovéale. Ces champs vont développer une vision de plus en plus colorée et détaillée, jusqu'à atteindre l'acuité maximale dans la zone fovéale. Cette zone correspond ainsi à la partie de lumière touchant la fovéa, zone la plus sensible et précise de l'œil.

2.1.2 Perception visuelle du mouvement

Outre les informations sur la couleur et la forme des objets environnants, le système visuel permet également de percevoir les mouvements. En effet, cette modalité visuelle est même considérée comme principale actrice dans la perception humaine du mouvement, de soi ou d'un objet. Cette perception est, comme nous allons le voir, issue du flux optique ainsi que d'analyse spatio-temporelle.

Flux optique

Le flux optique est un concept apparu dans les années 1950 [Gibson 2014]. Cette notion a été largement étudiée car elle permet d'extraire des informations aussi bien sur la direction du mouvement que sur la vitesse. La notion de flux optique renvoie à la transformation de l'image formée sur la rétine lors de déplacements propres ou des objets. Or, ce changement est continu, à l'exception près des mouvements de saccades oculaires, qui sont des variations brutales survenant entre $10\,^{\circ}\,\mathrm{s}^{-1}$ et $1000\,^{\circ}\,\mathrm{s}^{-1}$. Ce changement se caractérise par le schéma formé de l'ensemble des éléments lumineux en mouvement, pouvant être assimilé à un champ vectoriel.

L'humain utilise ce flux optique dans le but d'obtenir des informations comme sa direction de déplacement, sa vitesse, jusqu'à même pouvoir évaluer le temps avant le contact avec des obstacles [Lee 1976]. La structure de ce flux dépend du type de mouvement relatif entre l'observateur et l'environnement, permettant leur identification par l'interprétation du flux (cf. figure 2.7).

La figure 2.7 illustre différents flux rétiniens possibles en fonction des situations possibles. Les colonnes représentent différents types d'environnements : un plan horizontal

(par exemple le sol), un volume de points aléatoires (par exemple un tunnel) et un plan vertical (par exemple un mur). Les lignes représentent différents cas de combinaisons de déplacement de l'observateur par rapport à l'environnement ou de rotations de l'œil : un mouvement vers l'avant sans mouvement d'œil, un mouvement vers l'avant (en direction de la croix) pendant que le regard (indiqué par un cercle) est dirigé vers l'environnement, et pour finir un mouvement vers l'avant pendant que le regard suit l'environnement en mouvement horizontal.

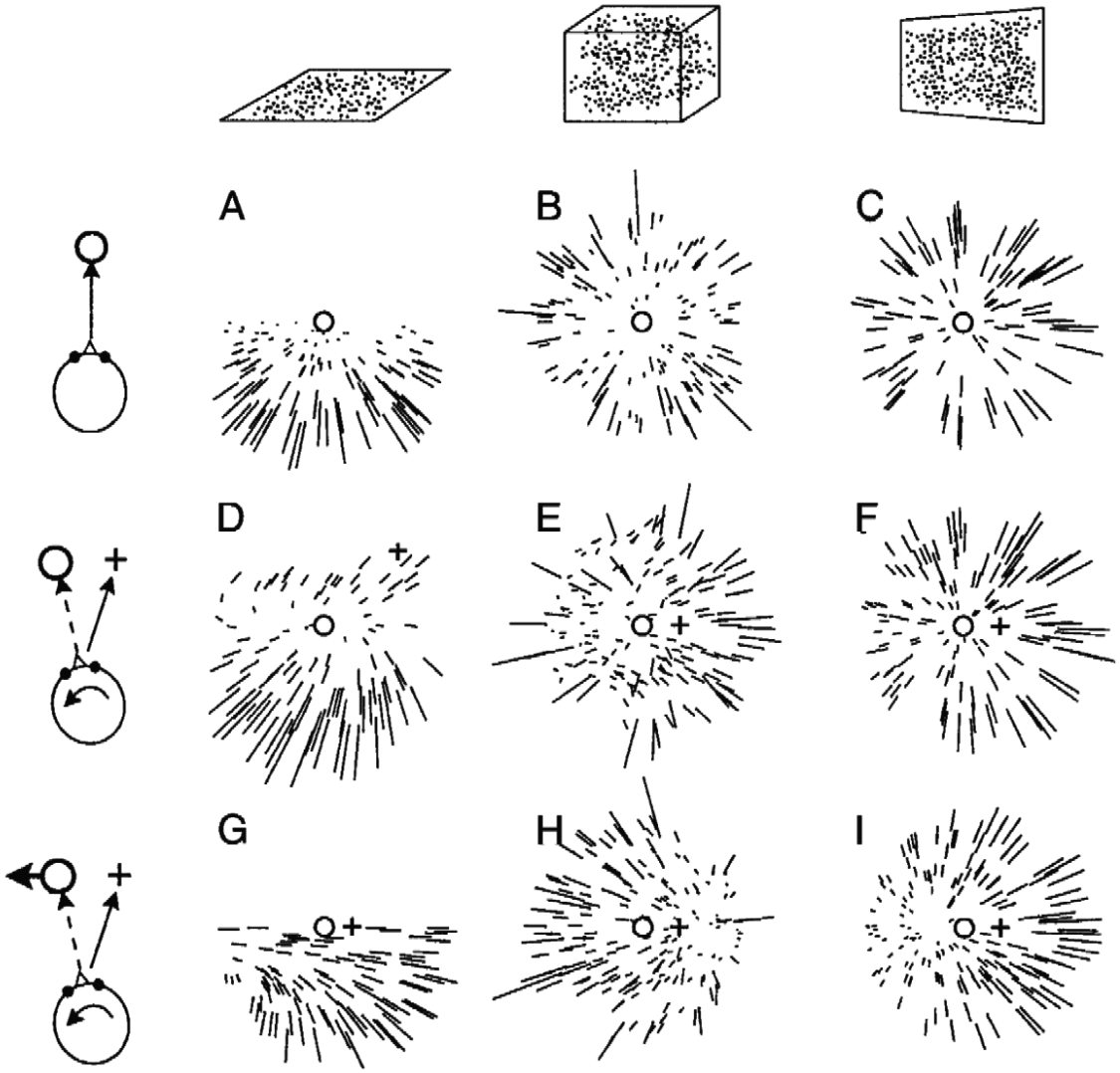


FIGURE 2.7 – Structures possibles de flux rétiniens [LAPPE et al. 1999]

Vection optocinétique

Dérivée du flux rétinien, la vection optocinétique est une puissante illusion de mouvement propre, induite par une stimulation visuelle. Ce phénomène s'illustre parfaitement avec l'illusion du train : lorsque le train voisin de celui à bord duquel nous nous trouvons

démarre, nous avons l'étrange impression qu'il s'agit de notre train qui est en mouvement. Cette illusion est d'autant plus dérangeante que le mouvement n'est pas ressenti par les autres sens. C'est pourquoi cette illusion est très utilisée dans le cadre de la simulation, et particulièrement dans les simulateurs fixes pour simuler le mouvement. Ce phénomène est observable dans le cadre de mouvements de translations ainsi que de rotations.

De nombreuses études ont été menées sur la vection, notamment grâce à des dispositifs de défilement de surface texturée (cf figure 2.8). Dès 1978, Borah et al. [1979] définissent quelques caractéristiques principales de la vection :

- L'établissement de la vection est principalement dû à la vision périphérique.
- La présence d'un objet stationnaire situé à l'avant du stimulus (flux de mouvement) n'affecte pas la vection et peut même la renforcer. À l'inverse, si l'objet stationnaire est situé en arrière-plan du mouvement visuel, la vection peut être annihilée.
- La vection n'est pas un phénomène instantané, cette latence dépend aussi bien du contexte que de l'individu.
- La vection peut être accentuée ou inhibée par la présence d'informations vestibulaires.

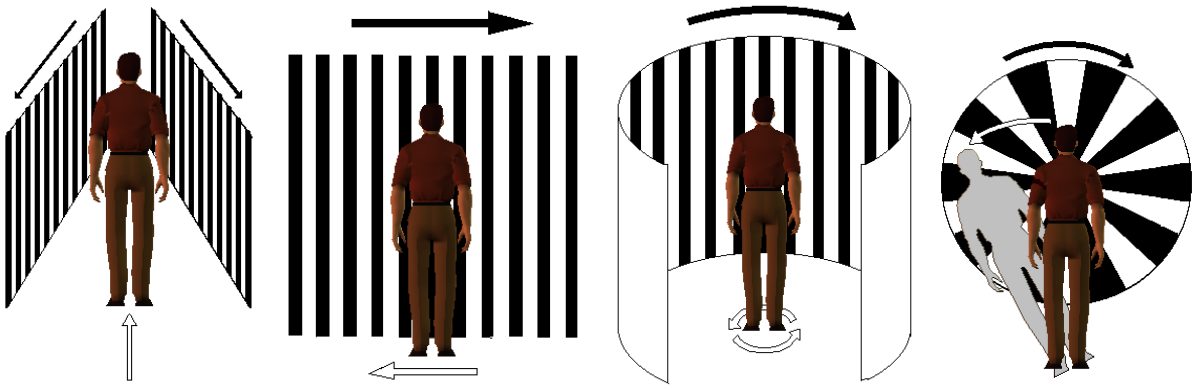


Figure 2.8 – Exemples de stimulation visuelle pour l'étude des vections [Neimer 2002]

La latence d'apparition de la vection peut varier de 1 à 10 secondes. Ensuite, à partir de 5 à 15 secondes, elle devient exclusive : on parle alors de vection saturée, désignant l'impression de mouvement propre dans un environnement visuel stationnaire. Les caractéristiques d'installation de la vection semblent assez similaires, qu'elle soit linéaire ou circulaire [Dichgans et Brandt 1978 ; Berthoz et Droulez 1982]. Le phénomène de vection peut même perdurer jusqu'à 30 secondes après la disparition du stimulus par extinction de la lumière. La latence et l'intensité du signal peuvent être influencés par d'autres facteurs comme la luminosité [Berthoz, Pavard et al. 1975], la couleur ou encore la complexité de la scène visuelle [Bonato et Bubka 2006]. De plus, la possibilité de déplacement ou la connaissance de la stationnarité de la scène sont deux paramètres qui peuvent amplifier la vection [Riecke, Schulte-Pelkum, Avraamides et al. 2006].

La vection a surtout été observée lors de perception visuelle de mouvement propre alors que les sujets sont stationnaires. Cela a conduit à considérer la vection comme une

illusion, c'est-à-dire une erreur perceptive commise par le cerveau. Cependant, ce point de vue a été remis en cause, notamment par Gibson [2014] grâce à sa théorie directe de la perception. Il y explique qu'un sujet observant par sa rétine un mouvement de l'environnement relativement à soi se perçoit nécessairement en mouvement. En effet, en conditions écologiques (naturelles), l'environnement est normalement stationnaire. L'illusion produite en laboratoire, simulateur ou film, n'est donc une illusion que du fait de notre inadaptation à ces nouveaux environnements.

Cette hypothèse, bien que quelque peu discutée, est renforcée au niveau neurophysiologique par l'activation constatée des noyaux vestibulaires pendant la vection [Dichgans et Brandt 1978], et ce suivant une évolution similaire du mouvement. Cette observation a conduit à l'hypothèse d'après laquelle la vection remplissait un rôle complémentaire à l'information vestibulaire. En effet, comme nous allons le voir par la suite, le système vestibulaire perçoit uniquement les accélérations. Une fois à vitesse constante, seuls d'autres sens comme la vision peuvent apporter des informations sur le mouvement propre. L'établissement progressif du signal de vection, assimilable à un filtre passe-bas, servirait ainsi à succéder progressivement au signal vestibulaire en diminution. La vection ne serait donc pas uniquement une illusion mais ferait bel et bien partie d'un mécanisme multisensoriel de la perception du mouvement complexe.

Perception spatio-temporelle

La perception de la vitesse et la perception des distances sont donc deux notions liées, à la seule différence du facteur temporel. Ainsi, la perception de la position d'un objet sur un temps donné nous permet d'évaluer sa vitesse, ou la nôtre. Le système visuel dispose de trois moyens d'évaluer les distances : des informations tirées de la vision monoculaire, des informations binoculaires et des informations apportées par l'analyse du mouvement.

Tout d'abord, la vision monoculaire (avec un seul œil) permet une approximation rapide de la profondeur d'un objet. Pour cela, le cerveau se réfère à plusieurs indices visuels. Premièrement, l'occlusion, qui correspond à un recouvrement partiel d'un objet par un autre. Elle fournit ainsi un indice qualitatif d'ordre relatif entre les objets en profondeur. Ensuite, l'analyse des tailles apparentes se base sur des effets de perspective qui font que plus un objet est loin, plus sa taille apparente est petite. L'effet est, par ailleurs, plus marqué sur un objet de taille connue ou sur les textures. C'est également le cas avec la perspective atmosphérique : plus un objet est loin, plus ses contours deviennent flous et ses couleurs atténuées par le trajet de la lumière dans l'air. Enfin, d'autres indices peuvent encore être analysés comme les ombres, la hauteur, etc.

Une information sur la distance d'un objet observé est aussi fournie par l'œil lui-même. En effet, afin d'obtenir une image nette sur la rétine, celui-ci doit réaliser une « mise au point », appelée accommodation. Celle-ci est obtenue par la déformation du cristallin, qui dépendra de la distance de l'objet fixé (cf figure 2.9). L'accommodation est réalisée par les deux yeux de façon couplée.

L'être humain disposant de deux yeux, cela lui permet ainsi une appréciation plus fine

des distances. Les deux yeux convergent normalement sur la même cible afin de permettre la projection de l'image de l'objet observé sur les fovéas respectives. Ainsi, plus l'objet fixé sera proche et plus la vergence des yeux sera importante (cf figure 2.10).

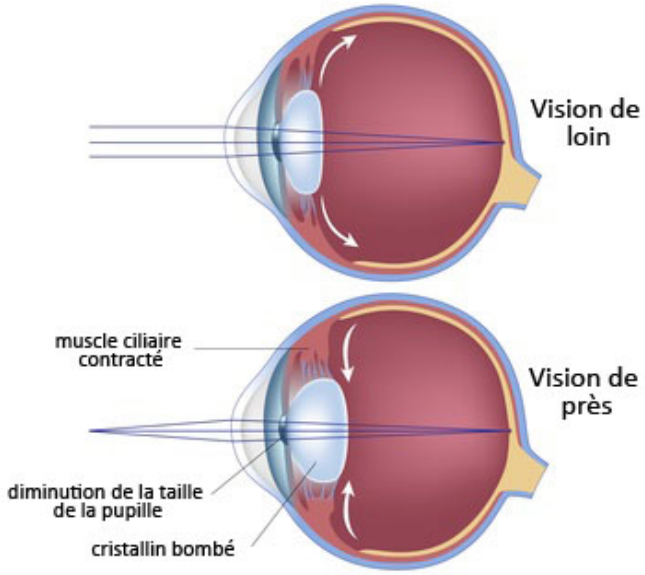


FIGURE 2.9 – Schéma de l'accommodation de l'œil par déformation du cristallin (`www.guide-vue.fr`)

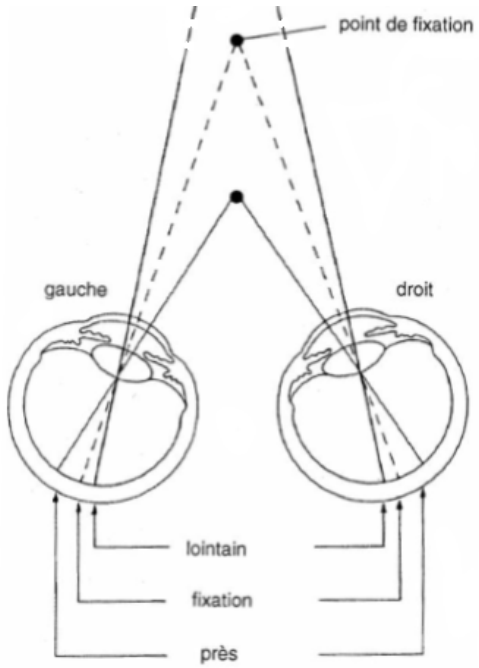
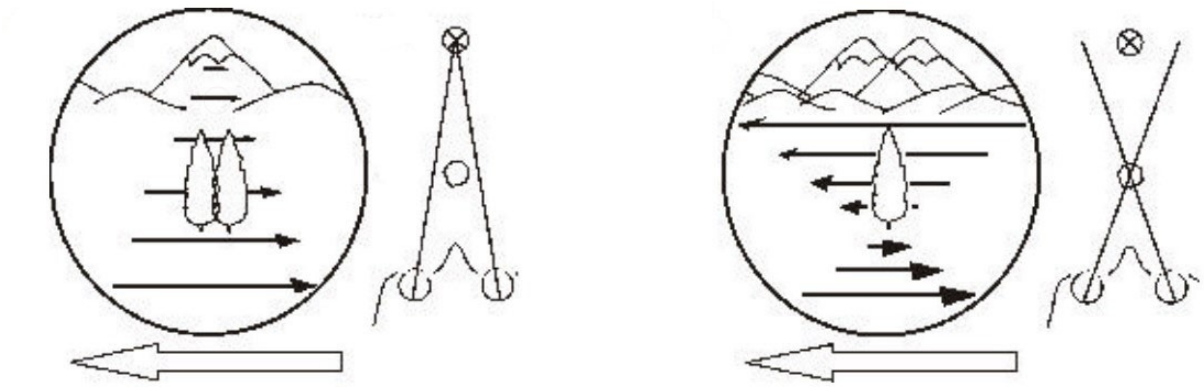


FIGURE 2.10 – Schéma du changement de vergence des yeux (`acces.ens-lyon.fr`)

Concernant ensuite la vision binoculaire, un des indices les plus importants pour la perception de distances moyennes est la disparité binoculaire, ou également nommée parallaxe binoculaire. Elle correspond à la différence qui existe entre les deux images chacune perçue par un œil, et est due à l'écart interoculaire ($\approx$ 6 cm). La perception binoculaire du relief, ou stéréopsie, est à la base de la plupart des technologies de vision 3D (films, VR, etc.). Cependant, son effet s'estompe avec la distance de l'objet observé. En effet, plus l'objet est éloigné et plus les axes de vision tendent vers des parallèles, réduisant ainsi les disparités. Cet indice est considéré comme efficace pour des distances inférieures à 20 mètres [CUTTING et VISHTON 1995].

Pour finir, le dernier indice pour l'appréciation des distances : la parallaxe de mouvement. Cet indice se fonde sur le même phénomène que celui précédemment exposé, exception faite que la différence de point de vue ne provient plus de l'écart interpupillaire, mais ici du mouvement relatif du point de vue de l'observateur. En effet, les déplacements de la tête de l'observateur entrainent un déplacement relatif apparent des objets de l'environnement observé. L'appréhension de ce déplacement dépend de leurs distances ainsi que du point de fixation du regard, permettant une appréciation qualitative de profondeur (cf figure 2.11). Dans le cas d'un déplacement linéaire, plus l'objet est près, plus son mouvement relatif est grand. Ceci explique, par exemple, qu'à bord d'un train en mouvement, le paysage défile moins vite que les poteaux en bord de voie. En ce qui concerne le cas d'un mouvement de rotation, si l'objet est situé derrière le centre de

rotation alors celui-ci se déplacera dans le sens opposé. Cet effet est très utilisé dans le cadre de l'animation avec la superposition de plusieurs couches de paysages se déplaçant à différentes vitesses.



(a) Cas d'un déplacement linéaire (b) Cas d'un mouvement de rotation

FIGURE 2.11 – Explication de la parallaxe de mouvement [SANDINI et al. 2001]

2.1.3 Système vestibulaire

Situé dans l'oreille interne, le système vestibulaire est un organe servant à la perception des inclinaisons et des mouvements de la tête, comparable à une centrale inertielle. Aussi appelé labyrinthe en raison de sa forme, il est composé d'un ensemble de canaux et de cavités de l'os temporal à proximité de la cochlée, organe sensoriel essentiel à l'audition (figure 2.12). Ce dernier est central dans le maintien de l'équilibre du corps ainsi qu'à la stabilisation du regard et de la perception du mouvement. C'est pourquoi des troubles du système vestibulaire peuvent conduire à des pertes d'équilibre et de postures ainsi qu'à des vertiges.

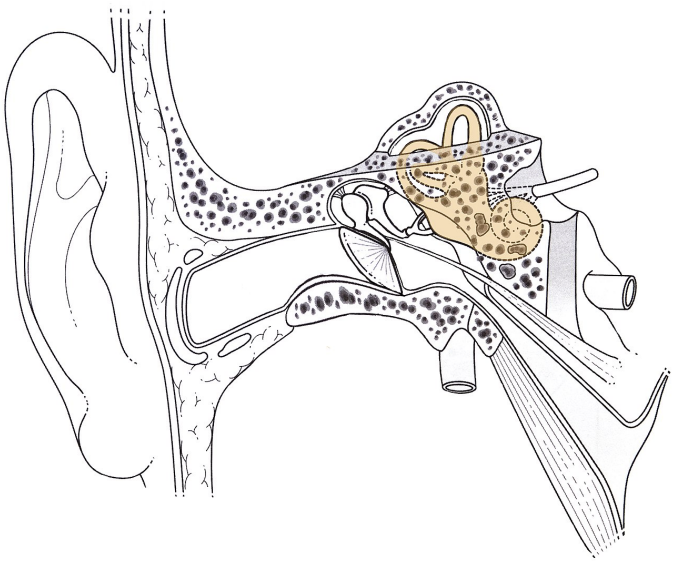


FIGURE 2.12 – Place de l'oreille interne dans l'os temporal (`fr.wikipedia.org`)

Anatomie générale de l'appareil vestibulaire

Le système vestibulaire est constitué de deux labyrinthes, droit et gauche, chacun composé de deux types d'organes sensoriels : trois canaux semi-circulaires (horizontal, antérieur et postérieur) et deux organes à otolithes (l'utricule et le saccule). Ces deux types d'organes contiennent un liquide intracellulaire visqueux, l'endolymphe, essentiel à la détection des mouvements. Ces organes sont reliés au ganglion de Scarpa (ou vestibulaire), lui-même relié au tronc cérébral, assurant la transmission des informations vestibulaires via le nerf vestibulocochléaire (figure 2.13).

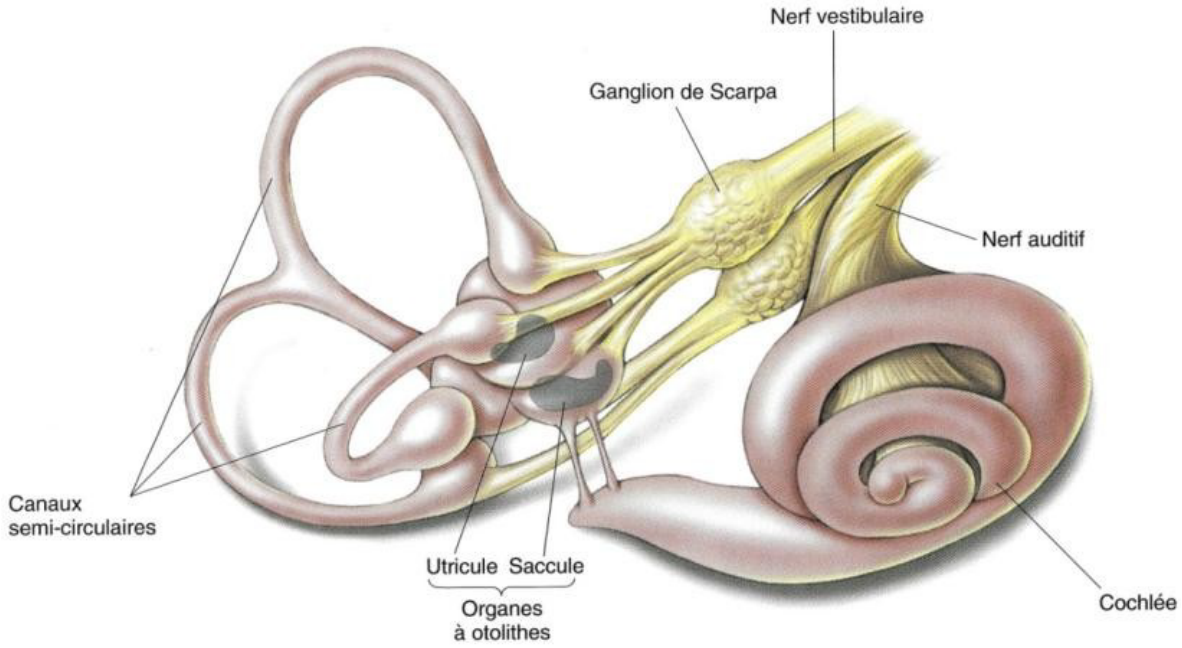


FIGURE 2.13 – Le système vestibulaire de l'Homme [BEAR et al. 2002]

Même si les organes vestibulaires présentent des similarités de fonctionnement, ceux-ci réagissent à des types de stimulus différents. Les canaux semi-circulaires perçoivent les accélérations angulaires de la tête, alors que les organes otolithiques perçoivent les accélérations linéaires ainsi que les inclinaisons de la tête.

Ce type d'appareil vestibulaire, présent chez la plupart des mammifères, est un héritage des animaux aquatiques apparu assez tôt dans l'évolution des vertébrés. De surcroit, une fois sa structure tridimensionnelle acquise, celle-ci a très peu évoluée. Le labyrinthe vestibulaire apparait donc comme une solution évolutive suffisamment stable pour percevoir les mouvements dans l'espace tridimensionnel.

Les canaux semi-circulaires

Les canaux semi-circulaires sont les principaux organes impliqués dans la détection des mouvements et des rotations de la tête. Ils sont au nombre de trois, et ce de chaque

côté de la tête : un canal horizontal, un antérieur (ou supérieur) et un postérieur. Ils sont fixes dans le repère de la tête et disposés de façon orthogonale (perpendiculaires les uns aux autres) afin de couvrir la perception de toutes les rotations suivant les trois dimensions spatiales.

Contrairement à ce que l'on pourrait intuitivement penser, ces plans ne sont pas orientés suivant les plans corporels principaux (horizontal, frontal et sagittal). Le canal horizontal est incliné d'environ 25 à 30° par rapport au plan horizontal et les canaux antérieur et postérieur sont inclinés d'environ 45° par rapport à l'axe sagittal de la tête (cf.figure 2.14). Cette orientation fait que chaque canal a son pendant controlatéral, tous deux sur le même plan et codant donc les rotations du même axe. En conséquence, on obtient ainsi la configuration suivante : les deux canaux horizontaux qui sont coplanaires et les canaux antérieurs qui sont parallèles aux canaux postérieurs opposés.

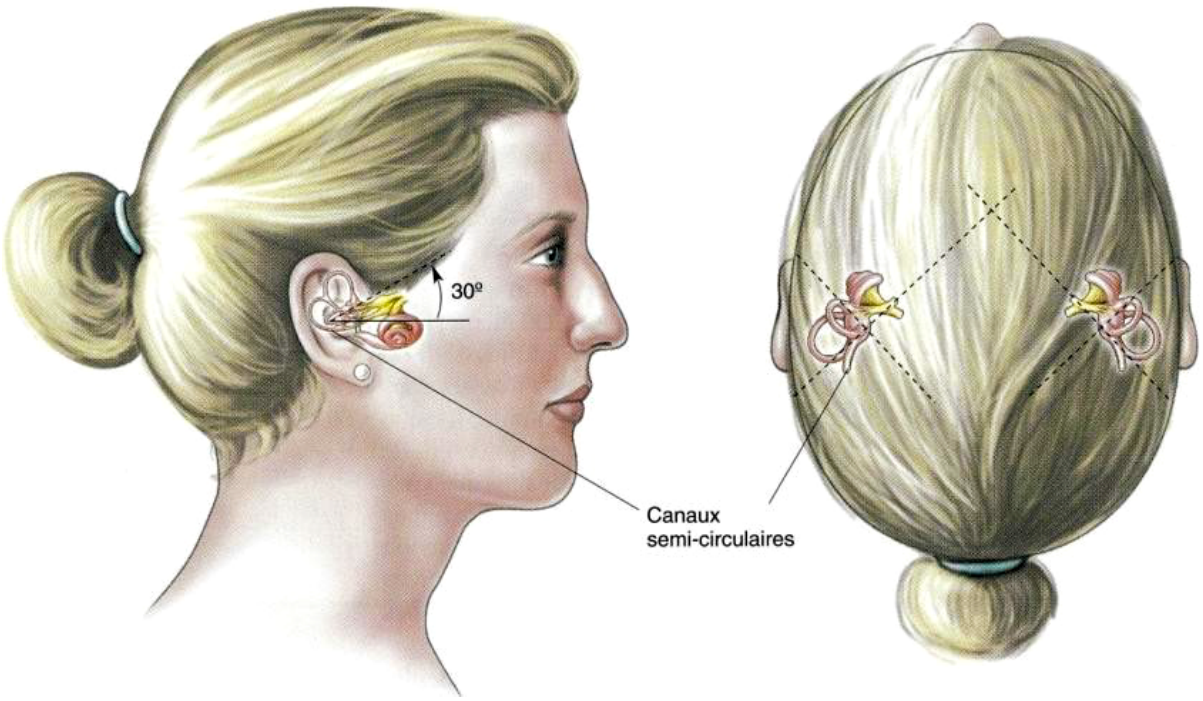


FIGURE 2.14 – Positions et orientations des systèmes vestibulaires et des canaux semi-circulaires [BEAR et al. 2002]

Les raisons de cette orientation ne sont pas encore complètement identifiées. Cependant, il a été constaté que les muscles oculaires sont orientés de la même manière [GRAF et KLAM 2006]. Cela facilite et accélère donc le traitement de l'information pour le réflexe vestibulo-oculaire (RVO), un des réflexes humain les plus rapides.

Les canaux semi-circulaires sont, comme leurs noms l'indiquent, de petits tuyaux osseux d'environ 6 mm de diamètre, remplis d'endolymphe et formant des cercles de 12 à 22 mm de longueur. À l'extrémité de chaque canal se trouve une ampoule osseuse, deux fois plus large que celui-ci, appelée crête ampullaire. Chaque crête ampullaire contient de nombreuses cellules ciliées maintenues dans une capsule de fibres gélatineuses appelée cupule (Figure 2.15). Le tout baigne dans l'endolymphe qui remplit le canal.

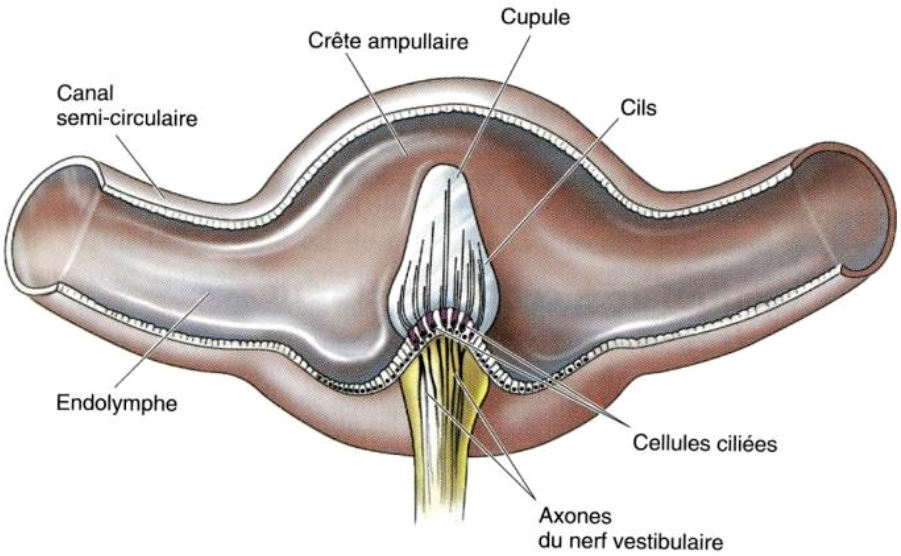


FIGURE 2.15 – Vue en coupe de la crête ampullaire d'un canal semi-circulaire [BEAR et al. 2002]

En cas de mouvement de rotation de la tête, l'endolymphe, en raison de son inertie, tend à rester immobile et va ainsi se désynchroniser du mouvement. Cela crée donc un mouvement de l'endolymphe par rapport aux canaux dans le sens contraire au mouvement initié (Figure 2.16). Par la force de pression, le déplacement de l'endolymphe va entrainer la cupule et la faire se courber avec les cils à l'intérieur. Les cellules ciliées vont alors transmettre des informations au cerveau, via le nerf vestibulaire, en fonction de l'inclinaison de leurs cils. D'autre part, la rotation suivant l'axe normal du plan canalaire est responsable d'une réponse neuronale maximale, permettant ainsi au cerveau d'évaluer l'axe de rotation en fonction des différentes réponses des canaux.

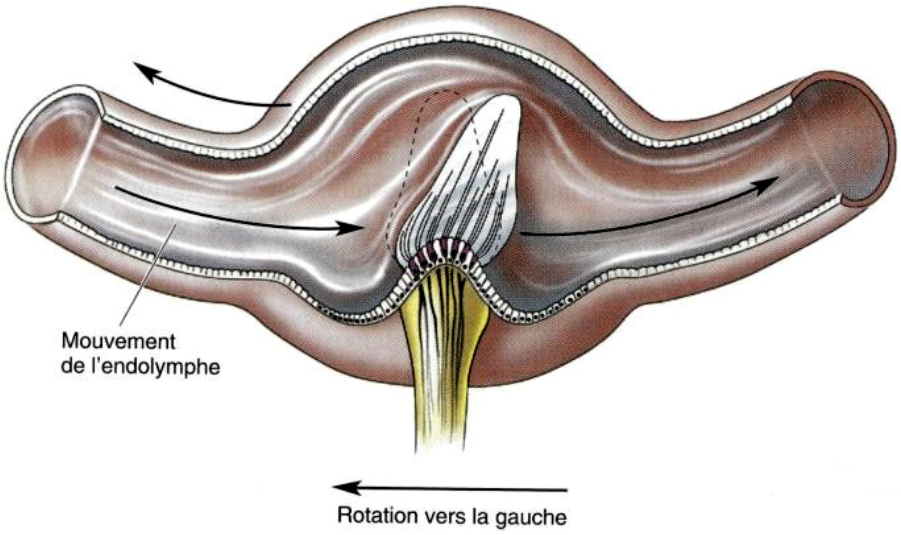


FIGURE 2.16 – Mouvement de l'endolymphe et de la crête ampullaire lors d'une rotation du canal semi-circulaire [BEAR et al. 2002]

Les cellules ciliées sont des cellules sensorielles asymétriques composées de plusieurs stéréocils et d'un kinocil. Ces cellules sont orientées dans un sens du mouvement du canal et organisées des plus petits aux plus grands cils en finissant par le kinocil. Cette asymétrie va conditionner leurs réponses : une inclinaison des cils vers le kinocil provoquera une dépolarisation, augmentant la fréquence de la décharge neuronale, la cellule sera alors excitée. À l'inverse, si les cils sont courbés dans l'autre sens (à l'opposé du kinocil), cela provoquera une hyperpolarisation diminuant la fréquence de décharge de la cellule ciliée, elle sera alors inhibée. L'information transmise au cerveau est un signal modulé en fréquence dépendant de l'inclinaison des cils et donc les accélérations angulaires de la tête. Les plans des canaux vestibulaires étant parallèles deux à deux, cela leur permet de fonctionner par couple. En raison de la symétrie des cellules ciliées, lorsqu'un canal est excité, l'autre est inhibé.

Les organes otolithiques

Les organes otolithiques sont aux nombres de deux par oreille : l'utricule et le saccule. Ces organes permettent de percevoir les accélérations rectilignes et les inclinaisons de la tête. Elles sont situées à la base des canaux semi-circulaires, l'utricule est orienté sur un plan majoritairement horizontal et le saccule, situé en dessous du premier, est quant à lui orienté plus ou moins verticalement (Figure 2.17).

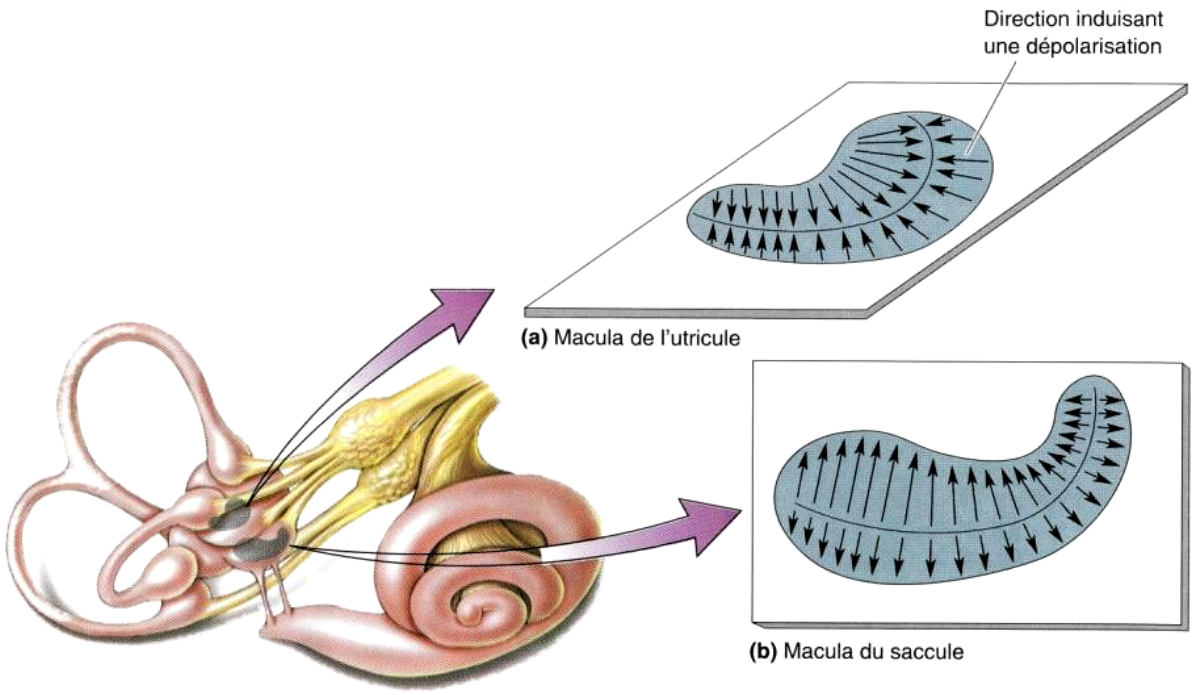


FIGURE 2.17 – Positions et orientations de l'utricule et du saccule [BEAR et al. 2002]

L'utricule et le saccule sont composés de dizaines de milliers de cellules ciliées chacun, regroupées dans une zone sensorielle appelée macula. Dans celles-ci, l'orientation des cellules ciliées varie afin de couvrir l'ensemble des directions de déplacement de la tête. Ces cellules sont arrangées par couple dans des directions opposées et fonctionnent de façon

similaire à celles des canaux. C'est-à-dire que pour un déplacement dans une direction, une cellule sera excitée alors que sa paire sera inhibée.

Les organes otolithiques se décomposent suivant trois couches (Figure 2.18) :

- La première, la couche inférieure, au contact de la paroi osseuse, est de ce fait solidaire du reste du système vestibulaire ainsi que des mouvements de la tête. Cette couche contient la base des cellules ciliées maintenues par des cellules de soutien.

- Ensuite, la couche intermédiaire, qui contient les cils des cellules ciliées, protégées par une substance gélatineuse.

- Finalement, la couche supérieure, composée d'otolithes, d'où le nom de ces organes. Les otolithes sont de petites concrétions de carbonate de calcium de 1 à 5 µm de diamètre. Ces cristaux, baignant dans l'endolymphe, sont maintenus englués par le gel de la couche précédente.

Lorsque ces organes sont soumis à une accélération, les otolithes, qui sont plus denses que l'endolymphe, tendent à rester immobiles en raison de leur inertie. Ce mécanisme aura pour effet de créer dans l'organe un mouvement des otolithes, inverse au sens de l'accélération. Cela crée ainsi une force de cisaillement dans la couche intermédiaire, faisant se courber les cils. Ensuite, les cellules ciliées transmettent l'information d'inclinaison des cils de manière analogue aux canaux semi-circulaires.

Les organes otolithiques permettent donc la perception des accélérations linéaires, avec notamment la pesanteur terrestre, verticale et orientée vers le sol. En effet, la pesanteur, due à la gravité terrestre, est une accélération particulière qui est constamment détectée, principalement par le saccule. Cette perception se révèle notamment très utile dans le contrôle et le maintien de l'équilibre corporel.

Cette perception continue de la gravité permet aussi de détecter l'orientation absolue de la tête par rapport à la verticale. Cependant, cette double fonction de détection, tant des accélérations que des inclinaisons, est à l'origine d'une ambiguïté perceptuelle. En effet, comme présenté en figure 2.20, lors d'une inclinaison de la tête certaines cellules ciliées vont détecter le mouvement d'otolithes dû à la gravité. Or, lors d'une accélération vers l'avant, la composante vectorielle gravito-inertielle reste assez similaire en sollicitant les mêmes cellules ciliées. Cette ambiguïté peut être étendue à toutes les accélérations du plan horizontal avec l'inclinaison de tête correspondante.

Même si les organes otolithiques ne font pas la distinction entre accélération et inclinaison, cette différentiation s'effectue grâce à d'autres organes dans la vie de tous les jours. Ce rôle est principalement remplit par les canaux semi-circulaires qui détectent les accélérations angulaires, ainsi que par le système visuel via la perception des objets alentours, notamment l'horizon.

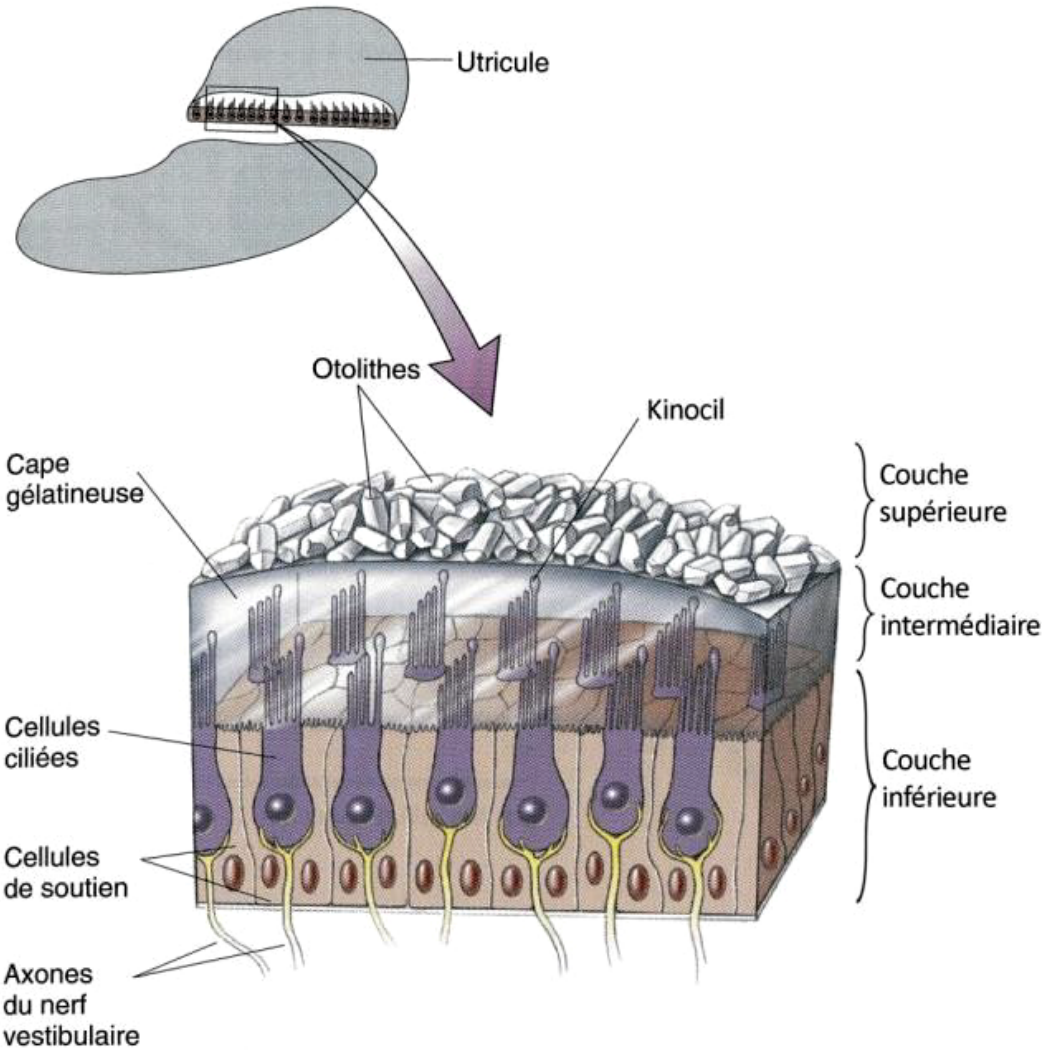


FIGURE 2.18 – Vue en coupe schématique de la macula d'un organe otolithique [BEAR et al. 2002]

Perception vestibulaire en conduite automobile et simulation

En raison de sa capacité à capter les accélérations et les rotations, le système vestibulaire joue un rôle central dans la perception du mouvement propre. Cela s'avère particulièrement vrai en situation de conduite réelle ou simulée. Il a d'ailleurs été démontré qu'en cas de système vestibulaire défectueux, les sujets avaient des difficultés à maintenir la trajectoire de leur véhicule [PAGE et GRESTY 1985]. De plus, afin de confirmer le rôle du système vestibulaire, il a été montré que des sujets transportés passivement dans l'obscurité totale, selon une trajectoire linéaire, étaient capables de reproduire précisément la distance parcourue, mais également approximativement les profils de vitesses subies [BERTHOZ, ISRAEL et al. 1995]. L'importance de ce rôle a également été aussi démontré en simulation, dès 1975, grâce à une étude sur simulateur à base mobile [MCLANE et WIERWILLE 1975]. En l'absence de tout mouvement du simulateur, les résultats ont

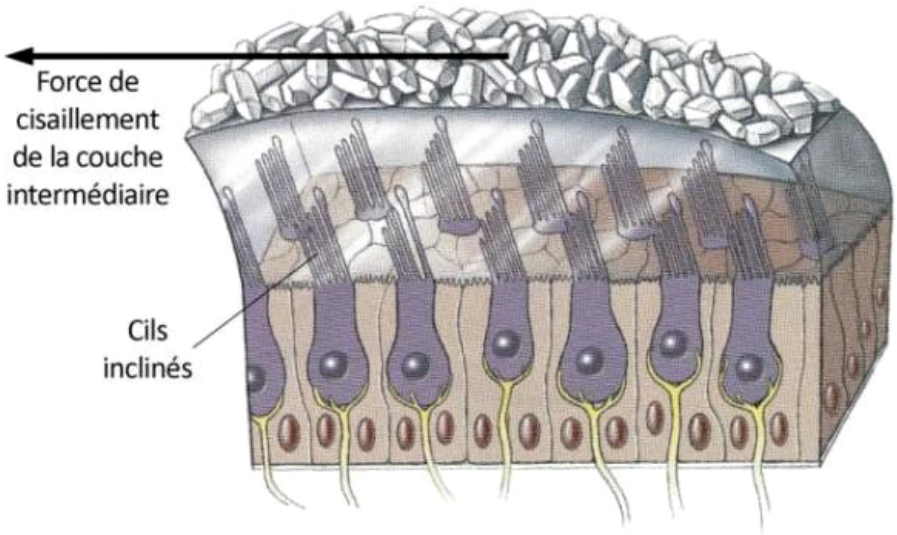


FIGURE 2.19 – Fonctionnement des organes otolithiques en accélération [BEAR et al. 2002]

mis en avant une dégradation des performances du contrôle du véhicule, à savoir des déviations latérales et en lacet.

Néanmoins, le fonctionnement des organes à otolithes et des canaux semi-circulaires reste imparfait. Ceux-ci disposent de seuils de détection en dessous desquels ils ne sont pas réceptifs. Dans le cas d'accélérations linéaires, le seuil se situe aux alentours de $5\,\mathrm{cm\,s^{-2}}$ [GIANNA et al. 1996]. Quant aux accélérations angulaires, ce seuil se situe légèrement en dessous de$2\,^{\circ}\,\mathrm{s}^{-2}$ [BRINGOUX et al. 2002]. Par ailleurs, ces seuils ne seraient apparemment pas constants : ils peuvent varier en fonction des individus, bien sûr, mais également de la durée du stimulus et du contexte. Ce léger défaut de perception est notamment utilisé en simulation de conduite afin de déplacer les simulateurs sans que le conducteur ne le perçoive.

Ensuite, le capteur vestibulaire étant un capteur inertiel, il ne perçoit pas les mouvements à vitesse linéaire constante. De surcroit, la transition d'une accélération à un mouvement à vitesse constante peut entrainer des sensations erronées de décélération. Dans la plupart des cas, d'autres capteurs sensoriels sont nécessaires pour clarifier l'ambiguïté créée par l'absence de messages vestibulaires. De plus, ceux-ci s'avèrent nécessaires dans le cas de l'ambiguïté gravito-inertielle entre l'accélération et l'inclinaison de la tête.

2.1.4 Audition

L'audition humaine est la capacité des êtres humains à entendre et interpréter les ondes sonores. Même si la vision est le système sensoriel le plus utilisé pour la perception humaine, l'audition n'est pas en reste. En effet, principalement utilisée dans les communications verbales, elle est aussi utilisée afin de percevoir des informations non visibles de notre environnement ou de compléter des informations visuelles.

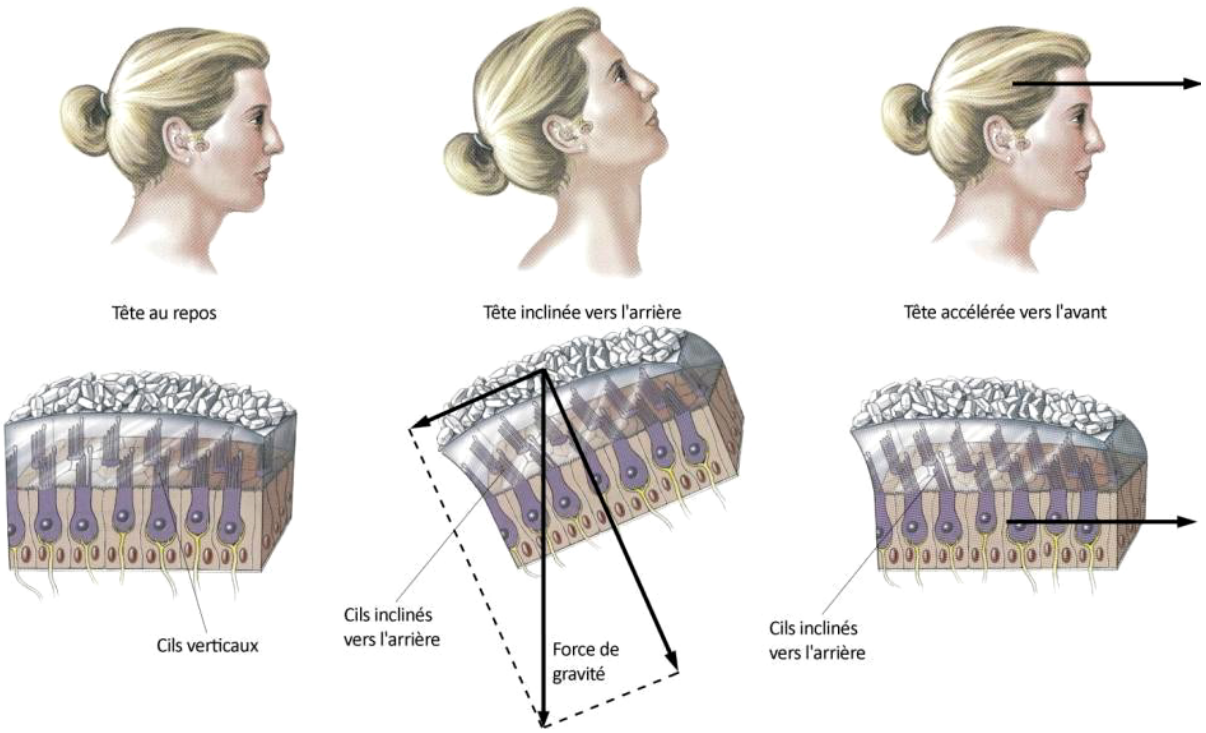


FIGURE 2.20 – Explication de l'ambiguité gravito-inertielle [BEAR et al. 2002]

Architecture du système auditif

Les oreilles sont les principaux organes impliqués dans la perception des ondes sonores (ou l'ouïe). En effet, comme abordé par la suite, d'autres organes peuvent aussi détecter les vibrations. Le fonctionnement de l'oreille peut être décomposé en trois parties (cf figure 2.21) :

- L'oreille externe, constituée du pavillon et du conduit auditif externe. Elle assure la captation des ondes acoustiques grâce à la forme du pavillon, puis les transmet vers l'oreille moyenne via le canal auditif.
- L'oreille moyenne, composée du tympan et de trois osselets : le marteau, l'enclume et l'étrier. Elle a pour rôle la transmission et l'adaptation du signal. Sous l'effet des ondes sonores, la membrane du tympan oscille et transforme le signal acoustique en vibrations mécaniques. Le signal transformé est ensuite transmis à l'oreille interne via le mouvement de la chaine des osselets. Ceux-ci servent à adapter le signal pour l'oreille interne qui est, contrairement à eux, en milieu liquide.
- L'oreille interne, englobant l'organe vestibulaire ainsi que la cochlée, est responsable de l'audition. La cochlée, qui est un colimaçon rempli d'endolymphe, reçoit le signal à travers la fenêtre ovale. La transduction en signaux nerveux s'établit grâce à l'organe de Corti. Il est un élément sensoriel de l'audition pourvu de milliers de cellules ciliées, à l'instar du système vestibulaire, et doté de sensibilités fréquentielles différentes.

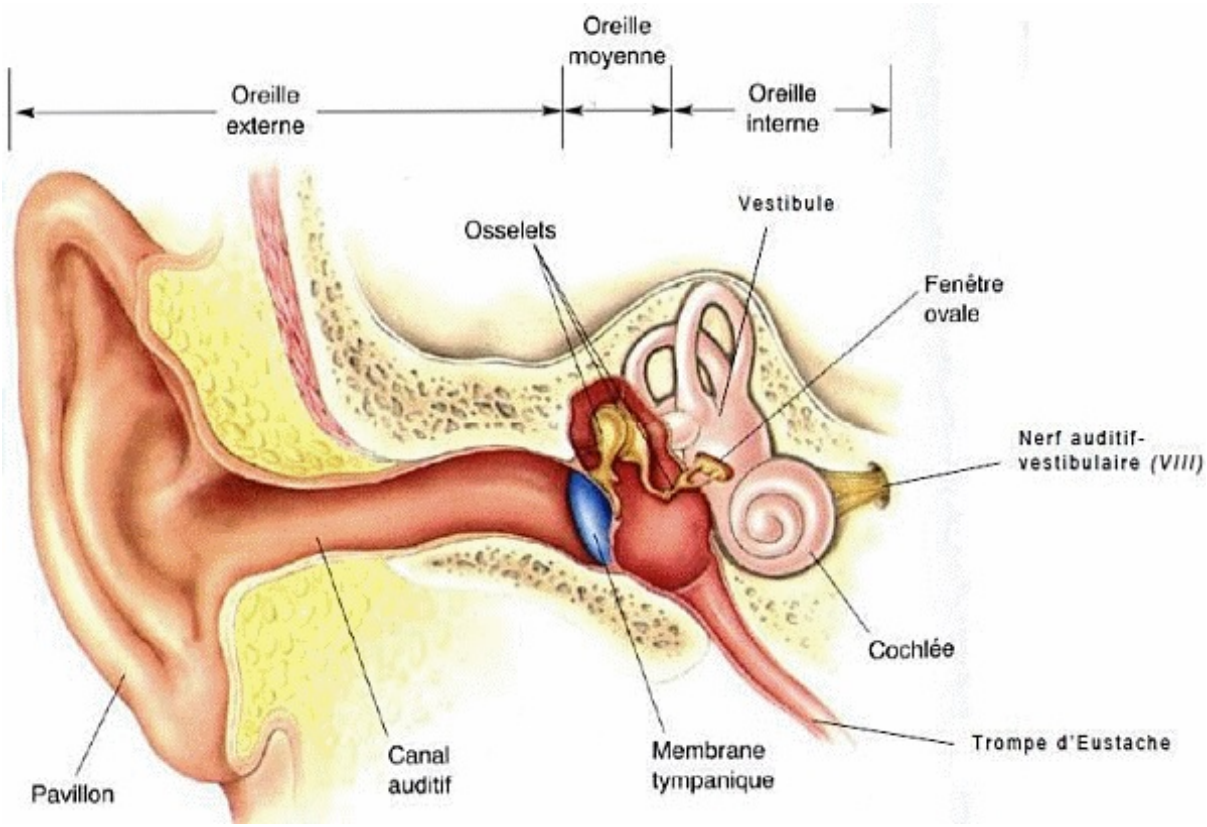


FIGURE 2.21 – Représentation schématique du système auditif [BEAR et al. 2002]

Localisation spatiale auditive

Au-delà de percevoir et interpréter des sources sonores, le système auditif est aussi capable de déterminer la position de celles-ci dans l'espace. À l'instar du système visuel qui dispose de deux yeux (binoculaire) pour une vision en relief, le système auditif dispose de deux oreilles (binaural). Le système binaural permet ainsi une spatialisation du son dans le plan horizontal. Dans le cadre d'une source isolée, ce fonctionnement est assez simple : l'emplacement de la source est déterminé grâce à la comparaison des deux signaux reçus par les oreilles afin d'analyser la différence d'amplitude (figure 2.23) et le délai (figure 2.22). Quant à la distance de cette source, son estimation se base sur l'analyse de la puissance du signal sonore ainsi que de sa comparaison à ses réverbérations.

L'analyse spatiale du système binaural est aussi complétée par la fonction de transfert relative à la tête, ou HRTF (head-related transfer function). En effet, lorsqu'une onde sonore rencontre la tête, plusieurs éléments viennent altérer ce signal. Le corps, la tête, ainsi que les organes auditifs (le pavillon et le conduit auditif) sont les principales causes de ces modifications en raison des diffractions, réflexions et atténuations. Les fonctions de transfert dépendent des individus et chacun apprend, au cours de sa vie, à interpréter ces informations pour localiser les sources sonores. Contrairement à l'analyse binaurale, l'analyse par HRTF permet une localisation horizontale et verticale.

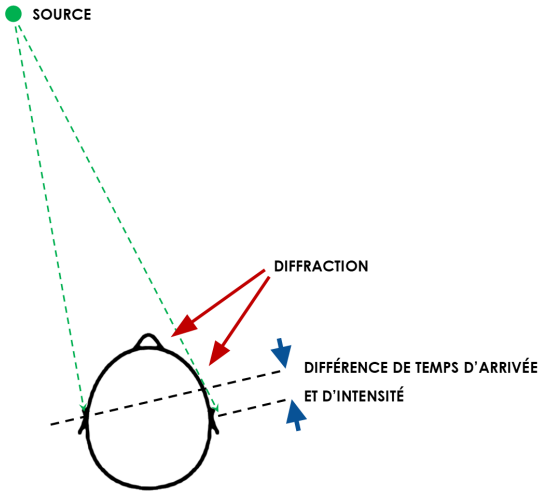


FIGURE 2.22 – Décalage temporel du signal binaural

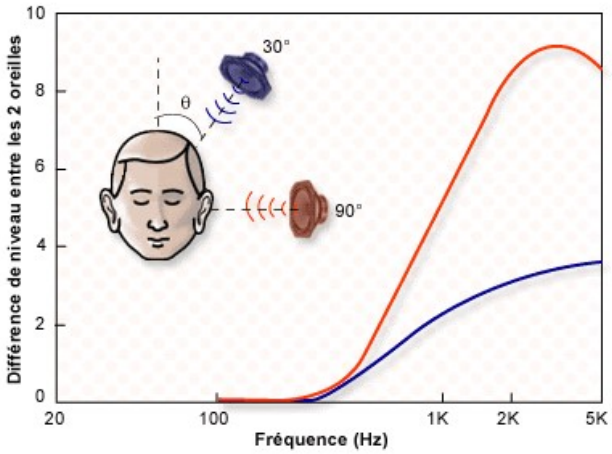


FIGURE 2.23 – Différence d'amplitude du signal sonore spatial (`www.neuroreille.com`)

Perception du mouvement sonore

Étant donné la capacité humaine de localisation spatiale sonore, l'être humain est donc également capable d'en déterminer le mouvement. Cette capacité est d'autant plus amplifiée par l'effet Doppler qui module la fréquence du signal sonore perçu lorsque la source est en mouvement. Cette capacité ne s'applique pas seulement aux objets environnants, mais aussi au mouvement propre. En effet, le mouvement cohérent des sources sonores environnantes peut créer un phénomène de vection [3] auditive [RIECKE, SCHULTE-PELKUM, CANIARD et BÜLTHOFF 2005].

En situation de conduite automobile, en plus de créer et d'améliorer la sensation de vitesse, les indices sonores sont des signaux importants. En effet, des indices sonores, tels que les bruits aérodynamiques du moteur et de l'interaction pneus-route, varient avec la vitesse en tendant vers les hautes fréquences. Tous ces bruits sont autant d'informations supplémentaires utiles au conducteur pour le contrôle de son véhicule, même si la tendance est à les réduire dans les véhicules récents. Il a été démontré qu'en l'absence d'indices sonores, les conducteurs avaient plus de mal à maintenir une vitesse constante [MCLANE et WIERWILLE 1975].

2.1.5 Somesthésie

La somesthésie est un système sensoriel dit de la sensibilité du corps. Elle regroupe plusieurs sensations (pression, chaleur, douleur...) de l'ensemble du corps. Ces sensations sont détectées par de nombreux récepteurs sensitifs du système somatosensoriel, situés dans plusieurs régions du corps (peau, tendons, poils, muscles, viscères...). Cet important

3. La vection est une sensation de mouvement du corps par rapport à son environnement

système sensoriel regroupe ainsi plusieurs sens physiologiques, comme le toucher ou la thermoception.

Bien que fournissant des indices dans la perception du mouvement, leurs contributions sont moindres dans les cas de la simulation de conduite. En particulier, Berthoz et Droulez [1982] identifient plusieurs niveaux de détection des mouvements avec en rôle principal, le système vestibulaire et la vision. Cependant, leurs rôles ne sont pas négliger et peuvent apporter une meilleure perception du mouvement.

Le sens haptique

La peau contient un ensemble de récepteurs sensibles à la pression, aux pincements, aux frottements, à la texture... Le sens haptique, ou toucher, dont une majorité des capteurs est située dans les doigts, sert principalement au toucher manuel (ou tact) mais est aussi présent dans le reste du corps. En situation de conduite, un grand nombre d'informations vont provenir de la sensibilité cutanée.

Les mains sont notamment très sollicitées au niveau du contact volant. En effet, quelques informations sur le véhicule peuvent être extraites de ce contact. Grâce, entre autres, à la détection du couple volant, le conducteur peut obtenir des informations sur la position des roues, de l'état de la route et de sa vitesse.

Qui plus est, les capteurs cutanés sur le reste du corps apportent aussi des informations sur la vitesse et les accélérations du véhicule. Ces informations sont extraites des différences de pression ressenties au niveau du contact avec le siège ou la ceinture. Étant donné l'inertie du corps par rapport à la voiture, le conducteur a tendance à se déplacer légèrement pendant les accélérations du véhicule, notamment lors des freinages ou virages, modifiant ainsi les pressions de contact.

En plus de la perception de la pression, le sens haptique capte également les vibrations au niveau des contacts, comme le volant ou le siège. Ainsi, ces informations peuvent renseigner le conducteur sur la vitesse et les accélérations du véhicule. En effet, une majeure partie des vibrations senties en situation de conduite proviennent du contact avec la route ainsi que du régime moteur. Or, ces signaux augmentent et varient en fréquence avec l'évolution de la vitesse du véhicule.

Proprioception et kinesthésie

La proprioception est notre capacité, consciente ou non, à percevoir les positions des différentes parties de notre corps dans l'espace, et ce même dans l'obscurité totale. Ce sens s'illustre typiquement par notre habileté à poser un doigt sur le bout de son nez les yeux fermés, par exemple. La proprioception, associée au système vestibulaire, est indispensable au maintien de l'équilibre et de la posture corporelle, ainsi qu'à la coordination des mouvements. La kinesthésie se réfère, quant à elle, plus spécifiquement

à l'aspect de la perception des mouvements du corps dans la proprioception.

La proprioception fonctionne grâce à un ensemble de capteurs, dits mécanorécepteurs, situés principalement dans nos muscles, tendons et articulations. Ils détectent les tensions dans les muscles et tendons ainsi que les mouvements au niveau des articulations. Ces capteurs envoient continuellement ces indications au cerveau qui en extrapole une position de l'ensemble du corps. Le cerveau peut alors contrôler et adapter la posture. Ces informations complètent celles fournies par la vision et le système vestibulaire en permettant de micro-ajustements très rapides. En plus d'offrir une perception spatiale du corps, la proprioception permet de percevoir les efforts appliqués sur chaque membre, et donc de réagir et d'adapter la posture à l'effort perçu.

En situation de conduite, la proprioception fournit rapidement au conducteur un retour sur ses actions à travers les retours d'efforts des pédales et du volant. Cela contribue à l'aider dans l'appréciation du mouvement de son véhicule, ainsi qu'à le préparer aux différents mouvements, comme contracter la nuque en cas de freinage brutal. En parallèle, la kinesthésie permet une appréciation des accélérations du véhicule grâce à l'inertie des membres qui se déplace légèrement lors de ces phases. De plus, la kinesthésie perçoit aussi les vibrations des membres qui sont affectés par les vibrations du véhicule, fournissant encore des indices sur la vitesse et l'accélération de celui-ci.

Viscéroception

Moins connue que les sens précédents, la viscéroception permet la perception des accélérations du corps grâce à des capteurs inertiels viscéraux péri-rénaux [Mittelstaedt 1997 ; Vaitl et al. 2002]. Lors des accélérations, les organes internes de l'abdomen sont déplacés par effet d'inertie, pouvant être perçu par différents capteurs de pression interne. Ces capteurs permettent ainsi, à l'instar des organes otolithiques, d'obtenir une perception des accélérations subies par le buste. Cependant, ces informations sont traitées par le cerveau avec une importance moindre que celle accordée au système vestibulaire. Elles pourraient toutefois être utiles dans des situations de forte accélération, notamment quand les otolithes sont saturés.

2.2 Simulation de conduite automobile

Maintenant que les systèmes perceptifs du mouvement sollicités en situation de conduite ont été identifiés, nous pouvons nous attarder sur la simulation de conduite en elle-même et étudier comment elle réussit à tromper ces sens. Nous allons aborder ici le fonctionnement des simulateurs de conduite immersifs, leurs architectures, ainsi que les différents systèmes utilisés pour simuler la perception de conduite. Nous allons, entre autres, nous pencher sur leurs limites pour pouvoir, par la suite, mieux aborder le contexte d'apparition du mal du simulateur ainsi que les possibles modifications à apporter pour sa réduction dans le cadre de nos recherches.

2.2.1 Simulateur de conduite

Un simulateur est un système permettant la modélisation de systèmes réels. Dans le cadre de la simulation de conduite automobile, il s'agit de permettre à un conducteur réel d'effectuer des tâches de conduite avec un véhicule virtuel. Nous sommes donc dans le cas d'un simulateur piloté où le conducteur, placé aux commandes de celui-ci, réagit en temps réel en accord avec la simulation. L'objectif de ce type de système est de restituer de façon réaliste les différents stimulus intervenant dans la conduite à travers plusieurs interfaces [Kemeny 2014]. En premier lieu, l'interface de commande qui permet au conducteur de piloter de véhicule virtuel avec, par exemple, un volant et des pédales. Ensuite, l'interface visuelle, un des stimulus le plus important en simulation de conduite, permet au conducteur de voir comme dans un vrai véhicule et d'observer le résultat de ses actions sur la conduite. Des interfaces haptiques (retour de couple volant) peuvent aussi intervenir mais également des stimulation kinesthésiques (simulation des mouvements, accélérations) et sonores.

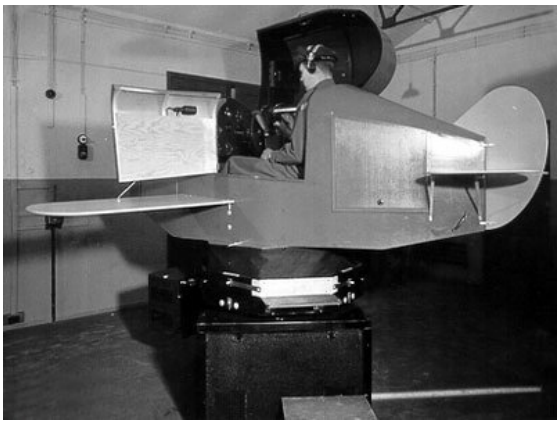
Les simulateurs de conduite permettent de placer un conducteur dans un environnement virtuel de conduite plus ou moins réaliste, mais totalement sous contrôle, plus sécuritaire et à moindre cout qu'en situation réelle. C'est pour ces motifs que les simulateurs de conduite se sont répandus dans les instituts de recherche et sont de plus en plus utilisés dans l'industrie automobile. Ils sont notamment très prisés pour la recherche, le développement et la validation de différents systèmes automobile comme l'ergonomie, les aides à la conduite avancées (ADAS), ou les systèmes de véhicule autonome. Ils ont pour atouts un grand contrôle sur l'environnement, un cout moindre que celui d'un prototype, et surtout l'absence de risque d'accident de la route [Kemeny et Panerai 2003]. Ils sont aussi utilisés pour les recherches sur le comportement humain lié à la tâche de conduite (perception, réactions, etc.), car ils présentent une grande répétabilité et une facilité de mise en œuvre. Leur utilisation s'est également étendue au cadre de la formation et de l'entrainement, qu'elle soit sportive (formule 1, etc.), professionnelle (poids lourds, etc), ou même grand public avec l'arrivée de simulateurs de conduite dans certaines auto-écoles.

La complexité du simulateur dépend des besoins et de son utilisation. Cependant, actuellement, même les simulateurs les plus perfectionnés ne peuvent simuler l'intégralité de la réalité : la définition des écrans et la luminosité sont encore assez éloignées des capacités de l'œil, la représentation des environnements n'est pas encore assez réaliste et surtout la restitution des mouvements est limitée par les capacités du système mécanique. Ces erreurs induisent des biais potentiels pour le pilote, pouvant affecter sa perception et son comportement. Dans le cadre d'une étude, ces biais requièrent d'être pris en compte dans le but de les contrer. Pour les validations ou formations, ceux-ci peuvent être surmontés par la réalisation de quelques conduites réelles de confirmation [W. Wachenfeld et Winner 2015].

2.2.2 Histoire et grands simulateurs

Les premiers simulateurs pilotés à voir le jour ont été des simulateurs de vol, compte tenu de la difficulté du pilotage, de son cout et surtout de son risque fatal pour un pilote inexpérimenté. Un de ces premiers simulateurs connus fut le « tonneau Antoinette » en 1910, simple poste de pilotage monté sur une rotule actionnée manuellement par des opérateurs (cf. figure 2.24a). Il faudra attendre le début des années 1930 pour se passer d'opérateurs et avoir un système de mouvement électropneumatique, avec par exemple la série des simulateurs *Link Trainer* (cf.figure 2.24b). Cette technologie a notamment été grandement poussée par l'aviation militaire et accélérée par l'entrée dans la Deuxième Guerre mondiale. Les simulateurs ont ensuite beaucoup évolué avec l'évolution de l'électronique : écrans, ordinateurs de calcul, visualisation 3D ...

(a) Le « tonneau Antoinette »



(b) Le simulateur *Link Trainer*

Figure 2.24 – Les débuts de la simulation de vol (`fr.wikipedia.org`)

Cette technologie s'est ensuite répandue à d'autres secteurs et notamment à l'automobile à partir des années 1960. À cette époque, les techniques de restitution visuelle étaient assez limitées et les premiers simulateurs ont été équipés de simples moniteurs qui diffusaient une scène de conduite qui se déroulait à vitesse variable selon des actions du conducteur [Denton 1966]. Cependant, cette technique ne permettait pas encore de contrôle latéral de la direction. Pour cela, les simulateurs ont alors utilisé une maquette

à échelle réduite de la scène de conduite où le conducteur, par ces actions, déplaçait une caméra à l'échelle, en fonction de la trajectoire calculée du véhicule [Hirose et al. 1976]. Le conducteur était placé dans un faux poste de conduite de voiture avec l'image filmée par la caméra projetée devant lui. Toutes les actions sur le volant et les pédales étaient reliées à un calculateur qui faisait se mouvoir la caméra dans la scène. À partir des années 1980, l'évolution de l'informatique avec la génération d'images de synthèse et les calculs temps réel ont permis aux simulateurs de conduite d'être complètement interactifs et sur tous types de scénario.

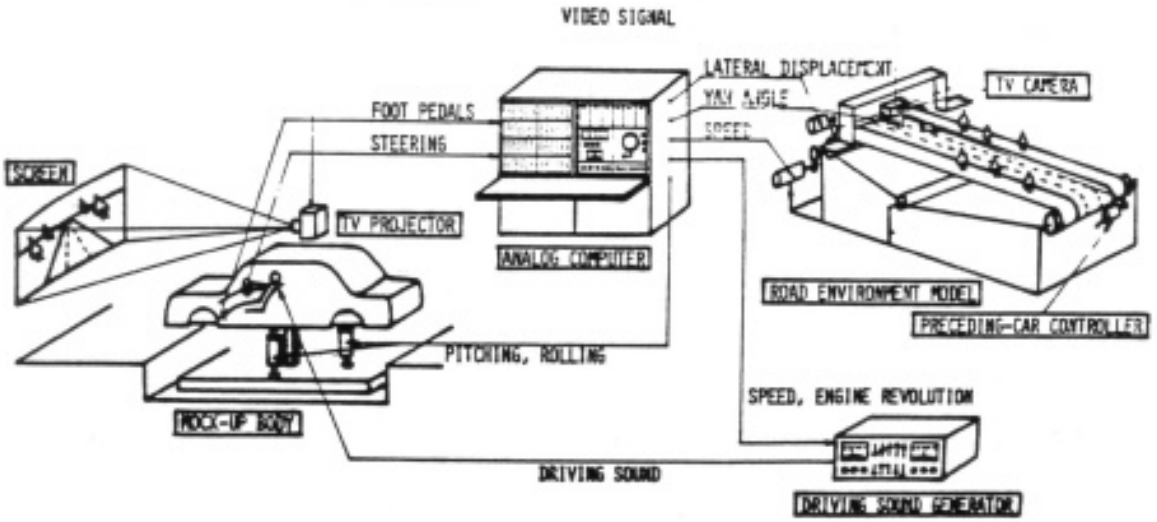


Figure 2.25 – Simulateur du MITI, à projection vidéo d'une maquette [Hirose et al. 1976]

En suivant l'évolution des simulateurs de vol, ceux de conduite ont pu hériter de plateformes mobiles destinées à restituer les mouvements du véhicule. Ces technologies, d'abord hydrauliques, puis électromécaniques ont contribué à l'essor de simulateurs dynamiques, contrairement aux simulateurs statiques dont la cabine est fixe. Les restitutions de mouvement ont été, dans un premier temps, une opportunité d'étudier le confort et la tenue de route des véhicules [Kohr 1961]. Par exemple, le simulateur de Général Motors simulait les mouvements de la cabine sans retour visuel (cf. figure 2.26).

Afin de créer des simulateurs plus immersifs, cette technologie a été associée aux systèmes de restitution visuelle, et s'est répandue dans les années 1980. Principalement encouragée par le constructeur automobile allemand Daimler-Benz [Drosdol et Panik 1985] avec, notamment en 1985, la mise en service d'un simulateur ambitieux pour l'époque. Il s'est avéré être un bon investissement au vu des nombreuses études d'études qu'il a permis d'effectuer [Grezlikowski et Schill 2000]. Ce simulateur était composé d'un écran circulaire avec six projecteurs, monté sur une plateforme mobile à 6 axes (3 translations et 3 rotations), elle-même montée sur un chariot mobile suivant l'axe latéral, permettant notamment de restituer les accélérations lors de changement de file [Drosdol et Panik 1985 ; Drosdol, Käding et al. 1986].

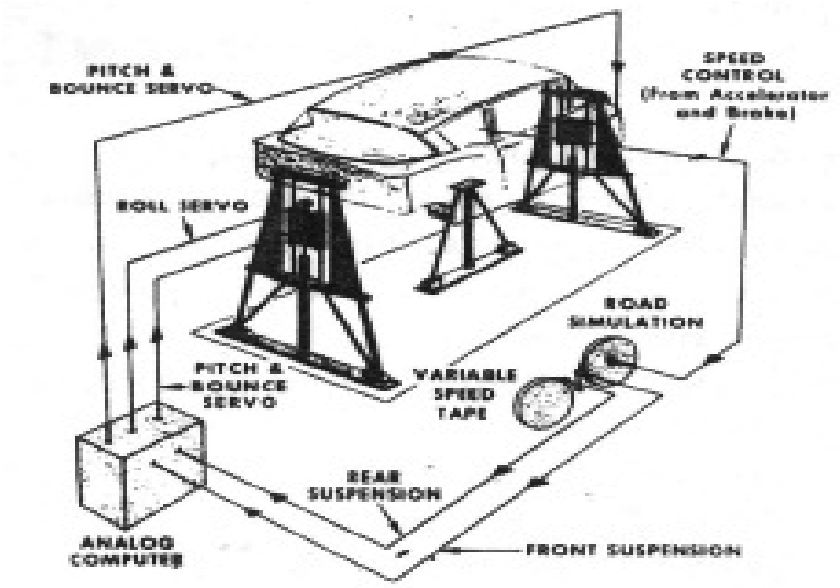


FIGURE 2.26 – Simulateur de tenue de route et confort [KOHR 1961]

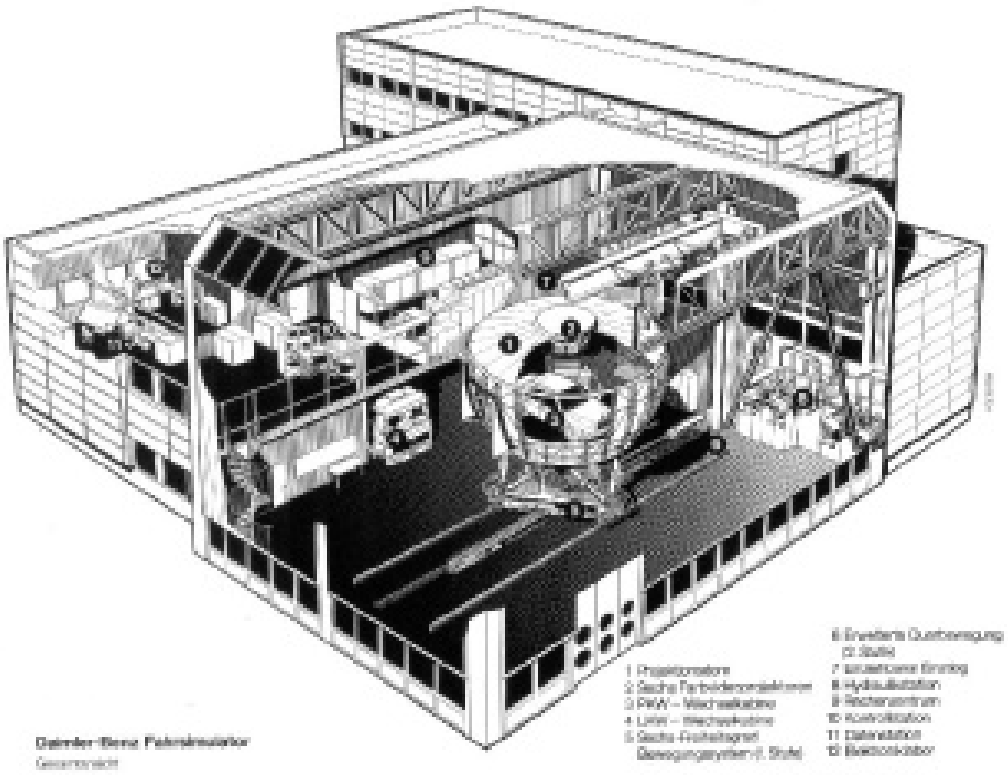


FIGURE 2.27 – Simulateur Daimler-Benz [DROSDOL et PANIK 1985]

Dans les années 90, les autres constructeurs automobiles, comme Ford, Chrysler et bien sûr Renault (cf 1.4.1), rejoignent le mouvement et ainsi se doter de leurs propres simulateurs (voir WEIR et CLARK [1995]). De plus, par rapport aux constructeurs, les

instituts de recherche ne sont pas en reste et construisent eux-aussi leurs propres simulateurs. Parmi ces simulateurs, on peut citer les simulateurs du centre VTI en Suède, dans l'institut national de recherche des routes et transports. Cet ensemble de simulateurs a principalement été conçu pour des études comportementales sur les conducteurs. Le premier d'entre eux a été conçu en 1984 [Nordmark, Lidstrom et al. 1984] et était composé d'un poste de pilotage reproduisant l'avant d'un véhicule sur lequel était fixé un écran hémicylindrique, offrant un champ de regard de 120°. Ce cockpit était montée sur une plateforme à deux axes de rotations, pour le roulis et le tangage, offrant une grande amplitude angulaire de ± 22°. L'ensemble était positionné sur des rails de 6 m suivant l'axe latéral.

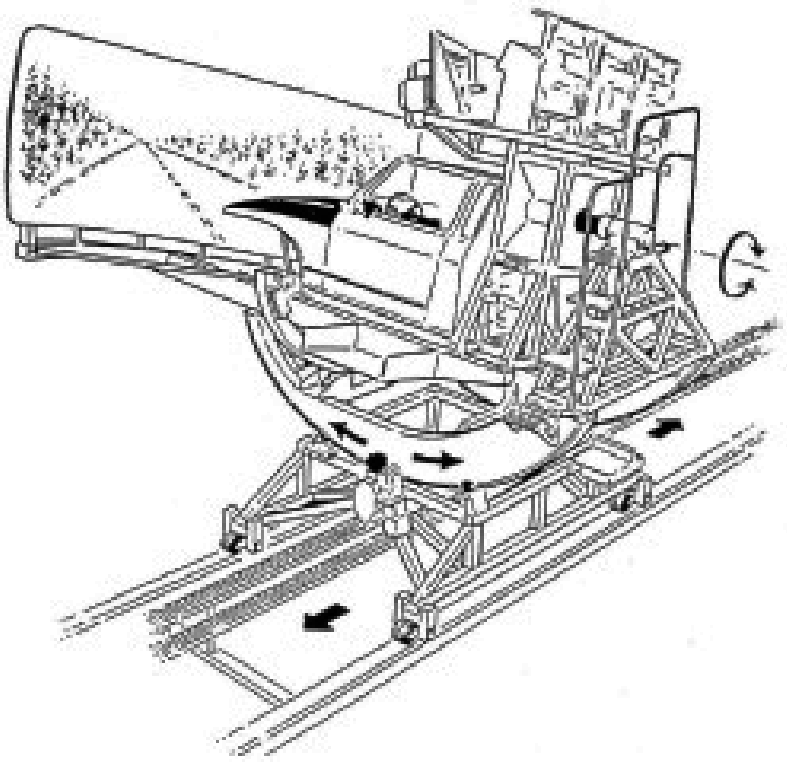


Figure 2.28 – Simulateur VTI 1 [Nordmark, Lidstrom et al. 1984]

Les simulateurs suivants du VTI ont été des évolutions de celui-ci, dont le dernier en date (sim VI) a été mis en service en 2010. Ces simulateurs, en plus d'offrir d'importantes capacités de mouvement avec des accélérations rapides, ont la particularité d'avoir été conçus de façon modulaire, donc rapidement adaptables aux besoins des différents projets de recherche [Nordmark, Jansson et al. 2004].

Les États-Unis aussi suivent la tendance et développer leurs simulateurs, avec notamment le simulateur NADS (National Advanced Driving Simulator). Mis en service en 2001, il a été le plus grand simulateur au monde jusqu'en 2007. Ce projet a été initié en 1993 par l'institut des transports des USA et développé en collaboration avec l'Université d'IOWA. Ce simulateur dispose de neuf degrés de liberté avec de grandes amplitudes qui lui permettent de reproduire des mouvements complexes [Garrott 1994]. Il comporte un dôme de 7 mètres de diamètre qui peut contenir une caisse de véhicule autour de

laquelle est projetée la scène virtuelle sur 360°. Le dôme peut tourner sur lui-même sur 330°, il est placé sur une plate-forme 6 axes et l'ensemble sur deux chariots capables de translations longitudinales et latérales d'environ 20 mètres.

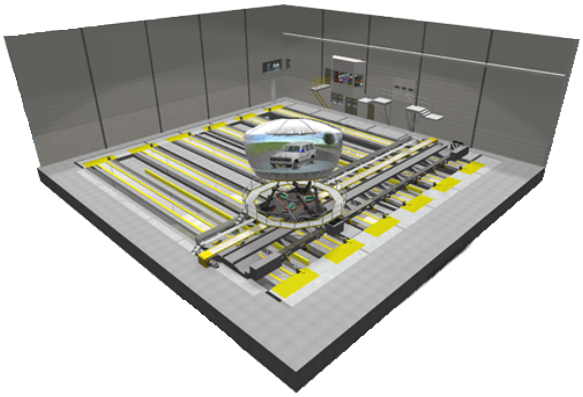


FIGURE 2.29 – Simulateur NADS

FIGURE 2.30 – Simulateur Toyota

En 2007 ce simulateur a été dépassé en taille par le simulateur du constructeur Toyota, qui reprend le même type d'architecture. Ce simulateur, actuellement le plus grand au monde, sera bientôt égalé par le simulateur ROADS, aussi sur la même configuration. Il proposera cependant de meilleures performances, notamment en permettant des accélérations jusqu'à 1 g dans les deux sens et sur les deux axes longitudinal et latéral (cf. GROUPE RENAULT [*ROADS*]).

2.2.3 Architecture et composants des simulateurs

Il n'y a pas de normes pour les simulateurs de conduite et la plupart d'entre eux sont des prototypes uniques, surtout dans le cadre des simulateurs hautes performances. Cependant, une architecture type peut être relevée (cf. figure 2.31), présente sur une majorité de simulateurs, ainsi que des composants et des caractéristiques similaires.

Les simulateurs peuvent ainsi être découpés en trois grandes parties : premièrement, le poste de conduite, qui permet au conducteur de piloter le véhicule virtuel en envoyant des informations au simulateur. Deuxièmement, la partie restitution, où le simulateur envoie les informations sur l'état du véhicule et l'environnement de la simulation. Enfin, la simulation elle-même, qui gère et calcule les différentes informations des deux parties précédentes, grâce à différents modèles, scénarios et calculateurs.

Poste de conduite

Éléments d'entrée du simulateur, le poste de conduite est là où est installé le conducteur pour la simulation. C'est à travers celui-ci que le pilote peut contrôler son véhicule

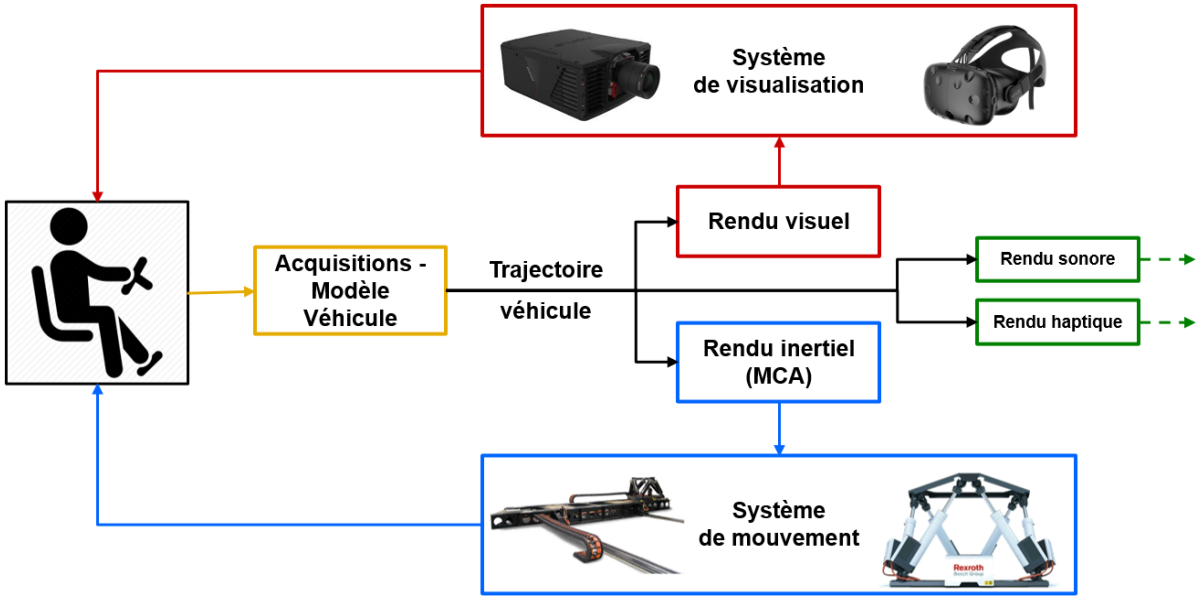


FIGURE 2.31 – Schéma d'architecture simulateur

virtuel dans la simulation, ou encore interagir via les éléments mis à sa disposition. Cet élément est indispensable à la simulation driver in the loop et doit permettre au conducteur d'extraire facilement les affordances indispensables à la conduite de son véhicule.

Ce poste de conduite peut aller du simple nécessaire, avec juste un volant et un pédalier, en passant par un cockpit complet et réaliste, comprenant les différentes interfaces, tableaux de bord et écrans, ainsi que les différentes commandes typiques d'une voiture. Il peut aller jusqu'à être constitué de vrais véhicules adaptés et instrumentés, et pouvant être interchangés au besoin, que l'on retrouve souvent dans des simulateurs hautes performances (cf. ROADS ou figures 2.29 et 2.30). Afin de ne pas surcharger le reste du simulateur, ces véhicules sont allégés des composants non nécessaires à la simulation, comme le moteur et les roues, mais conservent la carrosserie et l'intérieur pour l'immersion du conducteur.

Le poste de conduite reste le premier élément d'immersion du conducteur dans la simulation. C'est pourquoi plus les affordances et le design seront réalistes et convaincants, plus l'immersion et l'illusion seront importantes pour les conducteurs.

Les restitutions

Les restitutions constituent la deuxième partie importante et essentielle d'un simulateur de conduite. Le but du simulateur de conduite est de plonger le conducteur dans une situation de conduite virtuelle, et cette immersion se fait à travers différentes restitutions ou illusions perceptives humaines.

Parmi ces restitutions, se retrouve la plus importante et nécessaire (sauf cas exceptionnels cf. figure 2.26) : la restitution visuelle [BERTHOZ 1997]. En effet, la vue étant le sens

physiologique humain le plus utilisé par au quotidien, il est pour l'instant indispensable à la conduite d'un véhicule motorisé. Cela s'illustre par exemple en France avec l'exigence d'une acuité binoculaire au moins supérieure à 5 sur 10 pour l'obtention du permis de conduire (Arrêté du 18 décembre 2015). Cette restitution sera détaillée ci-dessous (cf. 2.2.4) car les systèmes peuvent grandement varier et donc jouer un rôle dans l'apparition des symptômes du mal du simulateur.

Deuxième restitution la plus courante, car simple à mettre en place : la restitution sonore. Cette restitution peut se faire simplement à partir d'enceintes et requiert moins de calculs qu'une restitution visuelle. Cependant, pour une meilleure immersion, le nombre et la qualité des enceintes peuvent être augmentés afin de restituer des sons réalistes et spatialisés, en vue d'obtenir une meilleure validité. La restitution sonore est importante pour l'immersion, mais aussi pour l'apport d'informations sur la vitesse ou régime moteur du véhicule. Le conducteur bénéficie alors d'une meilleure illusion du mouvement [Riecke, Schulte-Pelkum, Caniard et Bulthoff 2005], ainsi que de l'environnement extérieur (par exemple : un usager en train de doubler). Cette restitution sonore est également utile pour tester et valider des informations ou environnements sonores de futurs véhicules.

Ensuite, se trouve la restitution haptique, qui se fait principalement par des retours de forces dans le volant ou les pédales. Cette restitution favorise une conduite plus fine pour le pilote grâce aux informations sur les commandes, mais apporte aussi davantage de réalisme.

Les simulateurs peuvent, par ailleurs, disposer d'une restitution moins répandue : le rendu inertiel. En raison de son cout et de sa difficulté de mise en place, ce type de restitution ne se retrouve généralement que sur des simulateurs haute performance. Au vu de la complexité de ces systèmes ainsi que leur rôle dans le déclenchement du mal du simulateur, cette restitution sera plus amplement étudiée ci-après (cf. 2.2.5).

D'autres restitutions diverses existent, telles que les interfaces utilisateurs (UI) avec les tableaux de bord et les écrans, ou encore les vibrations et infrabasses, et, bien sûr, certaines plus spécifiques aux besoins des différentes études réalisées sur les simulateurs.

Modèles, simulation et calculs

Noyaux du simulateur, cette partie gère l'ensemble des composants de celui-ci. Elle reçoit les informations de pilotage du poste de conduite et transmet les différentes informations à restituer au conducteur en fonction des scénarios et modèles. Pour calculer l'état du véhicule virtuel, cette partie dispose notamment d'un moteur de simulation (par exemple chez Renault le logiciel SCANeR™ Studio) dans lequel sont implémentés différents modèles. Parmi ces modèles, sont à citer les modèles de routes (généralement extrait de routes réelles scannées), les modèles de comportements du véhicule (courbe d'accélération, vitesse max, tenue de route etc), les modèles de trafics (modèles comportementaux des autres usagers) et bien d'autres propres au besoin de la simulation. Cette partie dispose également de moteurs de restitution afin de calculer les bonnes in-

formations à envoyer aux différentes parties. Elle dispose, entre autres, d'un moteur de restitution visuelle 3D, un moteur physique et un algorithme de contrôle des mouvements du simulateur. De plus, la qualité et le réalisme de ces différents modèles et de ces rendus influent sur l'immersion, mais aussi sur le mal du simulateur. Par exemple, si le modèle de la voiture ou l'algorithme de contrôle ne sont pas cohérents avec la réalité, cela peut amener à de forts conflits sensoriels.

2.2.4 Restitution visuelle

La restitution visuelle constitue la part la plus importante et essentielle d'un simulateur de conduite. En effet, une grande majorité des informations requises lors de la conduite est fournie par la vision, et le conducteur doit être capable d'extraire trois types d'information de la scène visuelle : 1) des informations sur la disposition des surfaces et des objets, 2) des informations sur sa position et son mouvement par rapport à l'environnement, et 3) des informations sur les mouvements et les vitesses relatives des autres objets dans l'environnement [Kemeny et Panerai 2003]. Par conséquent, la qualité et les paramètres de ces affichages peuvent influer sur les perceptions du conducteur, ainsi que sur le mal du simulateur. Il est à ce titre intéressant de les détailler ci-dessous.

Systèmes d'affichage

Tel que vu précédemment, la plupart des grands simulateurs actuels utilisent des systèmes d'affichage par projection sur grand écran, de sorte à couvrir une partie conséquente du champ de regard [4] du conducteur. La projection peut être directe ou réalisée par rétroprojection avec écran semi-transparent. Pour les simulateurs à larges champs (par exemple les écrans hémicylindriques), l'utilisation de plusieurs vidéoprojecteurs découpant le champ de vision de l'affichage horizontalement en faisceau est conseillé pour limiter la distorsion des perspectives (cf figure 2.32). Chaque projecteur se voit affecter un point de vue décalé angulairement et le simulateur doit donc gérer la fusion et la superposition des différentes projections, souvent appelées par leurs dénominations anglaises : blending & warping.

Pour les simulateurs les plus simples, l'affichage s'effectue généralement par un ou plusieurs téléviseurs côte à côte, solution facile à mettre en œuvre, peu couteuse, et offrant une bonne qualité d'image avec beaucoup de contraste. Cependant, il est alors assez difficile de couvrir le champ de regard du conducteur. Les bords ainsi que la forme plate de ces écrans peuvent, de plus, déformer l'image et gêner à l'immersion. Dernièrement, des écrans borderless et/ou incurvés arrivent toutefois sur le marché mais restent des solutions assez onéreuses.

Avec l'arrivée récente des casques de réalité virtuelle (HMD « head -mounted dis-

4. Le champ de regard est la portion de l'espace vue par les yeux sans bouger le buste, mais la tête et les yeux mobiles.

play ») sur le marché du grand public (par exemple Oculus et HTC Vive), cette solution est de plus en plus envisagée pour les simulateurs [Hartfiel et Stark 2019]. Les visiocasques précédemment existants étaient, en effet, assez couteux et complexes à mettre en œuvre. Ces nouveaux dispositifs ont l'avantage d'être plus faciles à mettre en œuvre et couvrent l'intégralité du champ de regard de l'utilisateur, mais pas forcément de son champ de vision. Ainsi, la vision dans le casque peut sembler moins naturelle, tout comme la sensation et le poids du casque peuvent gêner et réduire l'immersion.

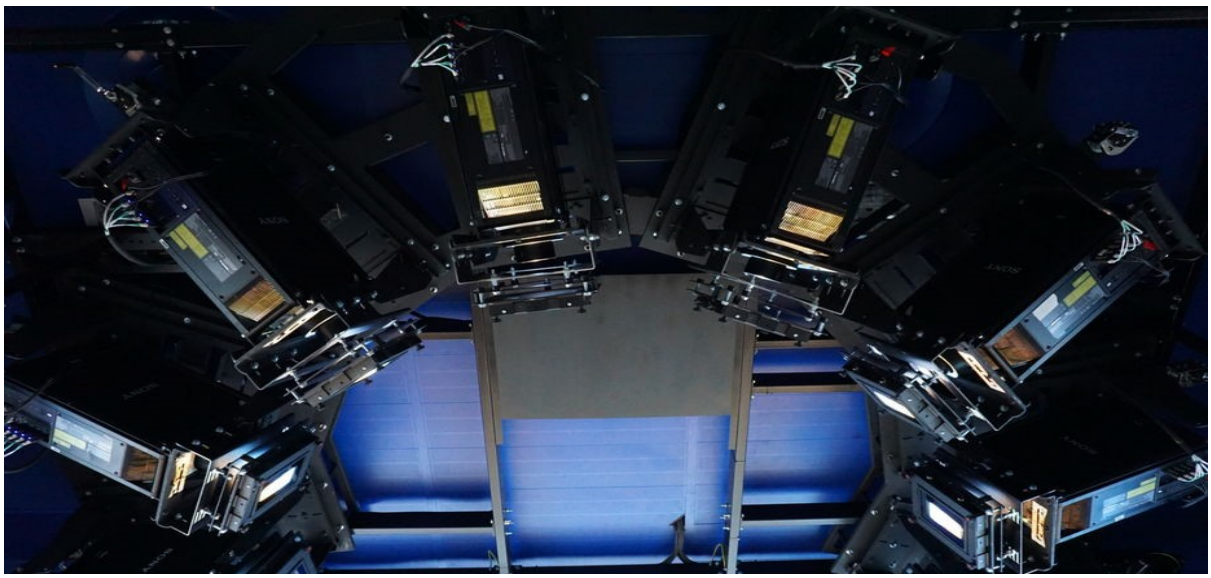


Figure 2.32 – Système de projection utilisé pour de grands écrans concaves

Champ de vision de l'affichage

Le champ de vision d'un système d'affichage (sous-référencé DFOV pour display field of view) renvoie à l'angle formé par les limites de l'affichage depuis le point de vue de l'observateur. Ce paramètre dépend de la taille d'affichage et de la distance de l'observateur (cf. figure 2.33). Il peut être décrit suivant ses deux composantes cartésiennes, horizontale et verticale (HFOV et VFOV). La composante horizontale est toutefois la plus souvent référencée en simulation DIL car le champ de vision vertical est souvent limité par le poste de pilotage. Le champ de vision des différents systèmes de visualisation peut grandement varier, du simple écran avec environ 30 à 40°, aux écrans hémicylindriques (ou hémisphérique) aux alentours de 220° afin de couvrir le champ de regard du conducteur, jusqu'aux écrans à 360°. En ce qui concerne les casques de réalité virtuelle pour le grand public (Oculus et HTC Vive par exemple), le champ de vision se situe généralement aux alentours de 90 à 110°. Cependant, certains casques spécifiques, comme le Pimax 8K ou leStarVR One, se rapprochent du champ de vision humain allant jusqu'à 180 à 210°.

D'une part, la différence de champ de vision joue un rôle important dans la perception de l'environnement par le conducteur. En effet, comme vu précédemment, le champ périphérique a une grande influence sur la vection et donc sur la perception de la vitesse pour le conducteur. Par conséquent, cette amplitude de champ de vision influence le contrôle

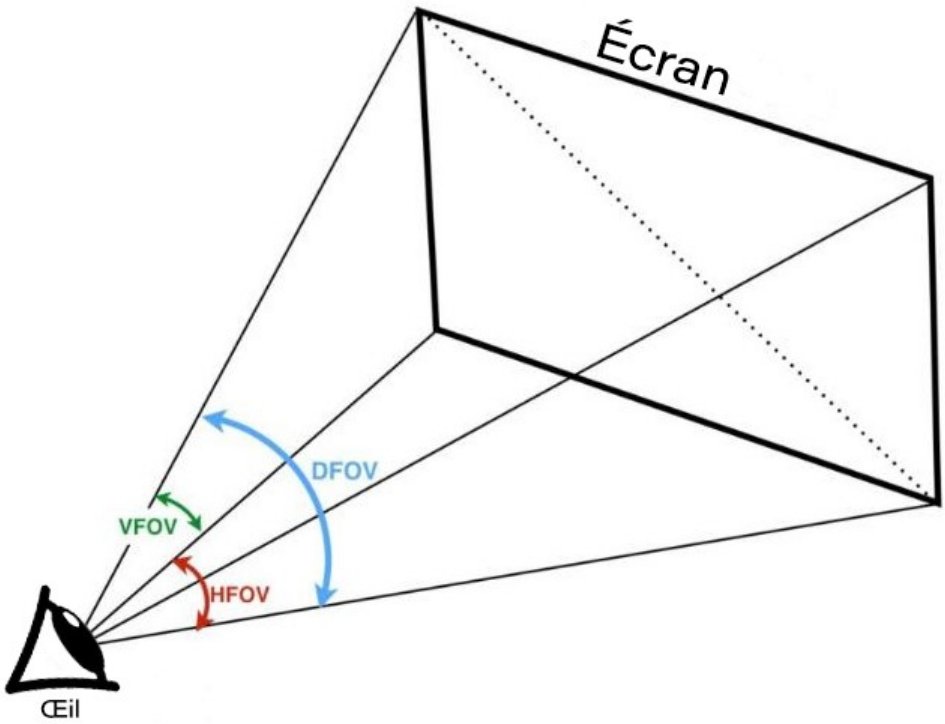


FIGURE 2.33 – Description schématique de l'ouverture du champ de visuel d'un observateur face à un écran

de vitesse du véhicule, le freinage et l'évaluation des distances par le conducteur [J. B. VAN ERP et PADMOS 2003]. En plus de la perception de vitesse, un grand champ de vision est nécessaire dans des contextes de conduite particuliers comme les manœuvres ou l'approche d'une intersection. Ces situation nécessitent la prise d'informations sur les piétons ou autres usagers de la route qui ne sont généralement pas dans le champ de vision direct du conducteur. C'est pourquoi, pour obtenir une bonne validité éthologique ou psychologique, un champ de vision horizontal d'au moins 180° est recommandé [HAUG 1990].

D'autre part, un grand champ de vision améliore grandement l'expérience de l'utilisateur en augmentant, entre autres, l'immersion ainsi que le sens de présence [5] [LIN et al. 2002]. Cependant, l'ouverture du champ de vision se fait souvent au détriment de la résolution, car pour augmenter celui-ci, sans rajouter de projecteur, il est possible, par exemple, de rapprocher l'utilisateur. Néanmoins, dans le choix de ce compromis il faut noter que la simulation paraitra plus réaliste dans une situation de « large champ visuel / basse résolution » qu'en situation de « haute résolution / champ visuel étroit » [JAMSON 2000].

En revanche, comme abordé en 3.3, un large champ de vision peut avoir un effet notable sur l'apparition du mal du simulateur, facteur important pour le choix de l'angle de vision de certains simulateurs.

5. La présence est l'expérience subjective d'être dans un lieu ou un environnement, même lorsque l'on n'y pas est physiquement.

Qualité d'image

La qualité d'image d'un système d'affichage peut être décrite par ses propriétés principales, à savoir : résolution, couleurs, luminance, contraste.

Parmi ces différents critères, la résolution est un paramètre potentiellement critique en simulation de conduite, surtout lorsqu'il s'agit de distinguer des objets à grande distance, par exemple la lecture d'un panneau de signalisation. Les effets d'une résolution limitée peuvent avoir un impact direct sur la performance de la tâche en nuisant à la perception de détails environnants qui seraient perceptibles en conduite réelle, mais peut aussi détériorer l'appréciation des distances et des vitesses [Jamson 2000 ; J. B. Van Erp et Padmos 2003].

La résolution des affichages est généralement exprimée en nombre de pixels par ligne, le pixel étant la plus petite unité d'affichage du système. Cependant, pour un être humain, la distinction de ces pixels dépend de la taille de l'affichage et de la distance à celui-ci. C'est pourquoi s'intéresser à l'acuité visuelle est alors plus pertinent, car elle exprime la résolution en termes d'angles. Elle correspond à la plus petite largeur angulaire observable ou, en d'autres termes, le plus petit écart angulaire perceptible entre deux motifs. Généralement, il est estimé que le système visuel humain possède une acuité monoscopique[6] comprise entre 30 secondes d'arc et 2 minutes d'arc, avec une moyenne à 1 minute d'arc [Fuchs et al. 2006], soit une résolution de 60 pixels/°. En découpant le champ de vision avec plusieurs projecteurs (cf. ci-dessus), cette résolution parvient actuellement à être dépassée grâce à des vidéoprojecteurs 8K (7680 × 4320 pixels). Cependant, les simulateurs dynamiques embarquent difficilement ce type de vidéoprojecteurs, car ceux-ci, assez récents, peuvent être relativement couteux et encombrants. Ils doivent, en effet, résister aux chocs et accélérations de ces simulateurs et demandent beaucoup de puissance de calculs. Quant aux casques de réalité virtuelle où l'écran est assez près des yeux, cette résolution dépassant l'acuité visuelle humaine, n'est à ce jour pas encore atteinte.

La luminance et le contraste sont deux variables liées, mais renvoyant chacune à une dimension spécifique. La luminance peut être définie comme la mesure psychophysique de l'intensité de la lumière émanant d'une source visuelle. Le contraste, quant à lui, est le ratio de la plus haute luminance sur la plus faible, luminance générée par le dispositif d'affichage. Comme abordé par la suite en 3.3, ces deux paramètres peuvent certes avoir une légère influence sur le mal du simulateur, mais vont surtout se révéler utiles pour le réalisme et l'immersion, par exemple lors d'une tâche de conduite face à l'éblouissement. En effet, les actuelles technologies existantes ne permettent pas un rendu fidèle de l'illumination. En environnement extérieur, la luminance de la scène peut varier de 10^{-1} à $10^{6}\,\mathrm{cd\,m^{-2}}$, alors que les luminances obtenues par les différents systèmes d'affichages ne dépassent pas les $10^{4}\,\mathrm{cd\,m^{-2}}$. À noter que les téléviseurs, et donc par extension les casques VR car les technologies sont semblables, offrent généralement plus de contraste et de luminance que les projecteurs.

La couleur, quant à elle, a peu d'impact sur le mal du simulateur, mais peut cepen-

6. Monoscopique : qui concerne la vision à un seul œil, ≠ Stéréoscopique.

dant impacter le réalisme et l'immersion. Elle peut même être un critère nécessaire pour certains simulateurs spécifiques, par exemple un simulateur d'éclairage (cf. 1.9b). Néanmoins, avec les technologies d'affichage actuelles, il n'est pas encore possible d'afficher l'entièreté des couleurs visibles par l'œil humain. Les gamuts[7] des principales normes des systèmes d'affichages dans le diagramme de chromaticité humain (CIE 1931) ont été représentés ci-dessous (cf. figure 2.34). La plupart des affichages, écrans, téléviseurs et projecteurs se situent aux alentours des normes rec. 709 ou sRGB. La norme Adobe RGB est privilégiée pour les écrans professionnels, par exemple pour la retouche photo, le montage vidéo, etc. Pour finir, la récente norme rec. 2020 (HDR), qui permet d'afficher plus de couleurs et se rapproche davantage de la vision humaine, reste cependant encore peu répandue.

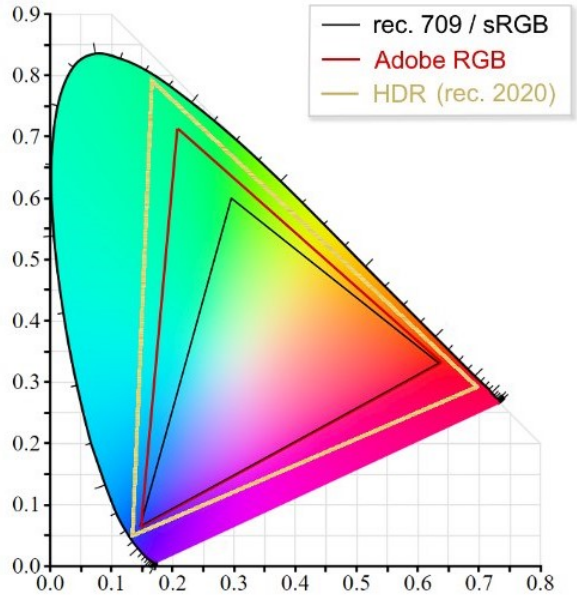


FIGURE 2.34 – Gamuts des principales normes d'affichage dans le diagramme de chomaticité humain (CIE 1931)

Caractéristiques temporelles

La fréquence d'images, la fréquence de rafraichissement et le temps de réponse sont trois paramètres temporels auxquels l'homme est sensible. Ils peuvent influer sur sa perception et jouer un rôle notable dans l'apparition du mal du simulateur.

La fréquence d'image est la fréquence à laquelle est générée une nouvelle image. Cette fréquence est liée à la vitesse de calcul de la carte graphique, et donc aussi au degré de difficulté de la scène visuelle à calculer. Même si l'œil humain fonctionne de façon continue, il est capable, grâce à deux illusions perceptuelles que sont l'effet phi et le mouvement bêta [B. NICHOLS et LEDERMAN 1980], de discerner un mouvement fluide à partir de 16

7. Le gamut est l'ensemble des couleurs qu'un dispositif permet de reproduire.

images par secondes (i/s). C'est cet effet qui est aujourd'hui utilisé pour la vidéo ou le cinéma, avec une norme à 24 i/s afin d'obtenir une meilleure fluidité. Toutefois, comme le champ périphérique est plus sensible aux mouvements, des fréquences plus importantes peuvent être nécessaires pour la simulation de grandes vitesses de déplacement, ainsi que pour une plus grande largeur du champ visuel. Une faible fréquence d'images peut donc avoir des conséquences logiques sur la tâche de conduite, particulièrement sur l'estimation des vitesses ou des freinages [J. B. Van Erp et Padmos 2003], ainsi que sur le mal du simulateur [Kolasinski 1995].

La fréquence de rafraichissement d'affichage est définie par le nombre d'images affichées par seconde par le dispositif. Cette fréquence, liée aux systèmes d'affichage, est généralement fixée à 50 ou 60 Hz et peut atteindre jusqu'à 240 Hz sur certains dispositifs. C'est notamment le cas de ceux utilisés dans le gaming pour la fluidité et la précision des mouvements rapides. Néanmoins, cette fréquence d'affichage est à l'origine d'un effet incommodant : le « flickering » ou scintillement de l'écran. Ce phénomène intervient lorsque la fréquence est trop lente, l'œil perçoit alors un effet de diminution/changement de luminosité (fading) entre les images. Hormis la fréquence d'affichage, cet effet dépend du seuil de perception de l'observateur, de la luminance de l'écran et de l'extérieur, et du champ de vision. Cette conséquence gênante est souvent mise en avant dans les facteurs d'apparition de fatigues oculaires ainsi que des cybermalaises [8]. Ce phénomène étant important dans l'apparition du mal du simulateur, il sera plus amplement traité dans le paragraphe 3.3.

Un dernier paramètre à intégrer est le temps de réponse ou latence. Il résulte de l'addition de différents délais dans la boucle acquisition-restitution, comportant : le transport des signaux de l'acquisition et de la restitution, les différents calculs de la simulation ainsi que de l'image, et la latence du système d'affichage. Cette latence, à laquelle le conducteur doit s'adapter, joue un rôle non négligeable dans le contrôle visuo-manuel du véhicule, ainsi que dans la gravité des symptômes du mal du simulateur. L'humain est capable de détecter des latences à partir de 50 ms [Brooks 1999] en simulation et peut tolérer des latences jusqu'à 320 ms pour de mouvements lents, contre 180 ms pour des mouvements rapides [Allison et al. 2001]. Cependant, pour les casques de réalité virtuelle, la latence de tracking de la tête vient s'ajouter à la liste de délais de la latence d'affichage, et nécessite des délais beaucoup plus courts (conseillé < 75 ms [Kemeny 2014]) à cause de son interaction avec le réflexe vestibulo-oculaire (RVO), détaillée ci-dessous.

Stéréoscopie et tracking de tête

La stéréoscopie est un procédé d'affichage qui permet de restituer l'impression de la vision en relief en affichant deux points de vue, différents pour chaque œil, afin de simuler la vision humaine. Cette illusion d'image 3D est produite grâce à la parallaxe binoculaire : la différence entre les deux images ainsi que l'écart interpupillaire permettent de déterminer la distance de l'objet (cf. 2.1.2). La mise en place de cette technique dans

8. Le cybermalaise désigne le malaise induit par des affichages virtuels générés par ordinateur, en cinéma ou en VR.

certains simulateurs se fait au travers de dispositifs tels que des casques de réalité virtuelle ou des lunettes 3D actives ou passives.

La stéréoscopie facilite l'évaluation visuelle des distances par le conducteur [J. Y. Chen et al. 2010], mais cette évaluation est surtout efficace pour les objets proches. En effet, au vu de la faible différence d'angle de convergence pour des objets lointains, il est plus dur pour notre système visuel d'estimer la distance. Dans la littérature, son rayon d'efficacité est souvent estimé aux alentours de 10 m [Matsushima et al. 2003], cela peut tout de même s'avérer utile pour les manœuvres. De plus, la stéréoscopie augmente également l'effet de vection, et donc la perception de vitesse pour le conducteur [Palmisano 1996].

Néanmoins, les technologies utilisées dégradent généralement la plupart des caractéristiques citées précédemment, ou nécessitent plus d'investissement afin de limiter leur influence. À ce titre, le doublement de la fréquence d'affichage ou même des systèmes de projection offrent notamment la possibilité de fournir une image différente pour chaque œil. De plus, les lunettes 3D créent une diminution de la luminosité ou une déformation des couleurs.

Une autre façon de donner du relief à un environnement virtuel est d'utiliser l'effet de parallaxe ou parallaxe de mouvement. Cet effet se base sur la différence de vitesse de déplacement d'un objet dans le champ de vision en fonction de son éloignement. Cet effet s'effectue automatiquement lors du déplacement de l'observateur dans l'environnement virtuel, mais peut être accentué par un suivi de la tête (« tracking ») avec la projection du point de vue associé. Cette technique, à l'efficacité proche de la stéréoscopie en simulation de conduite [Kemeny et Panerai 2003], présente l'avantage d'être moins intrusive pour le conducteur car elle peut être effectuée avec des caméras spécifiques. De plus, elle n'affectera pas la qualité de l'image, bien que la latence de cette technologie puisse générer des oscillopsies [9] pour le conducteur [Allison et al. 2001].

2.2.5 Restitution inertielle

La restitution inertielle a pour but de simuler les mouvements et les accélérations que devrait ressentir le conducteur dans la situation de conduite simulée. La stimulation du système vestibulaire s'effectue grâce à des plateformes mobiles. Ces dernières autorisent des mouvements suivant plusieurs degrés de liberté [10] au moyen de différents actionneurs mécaniques, tels que des vérins ou des rails. Il existe plusieurs types de technologies de mouvements différentes, et qui peuvent parfois être associées. Ces types sont des vibrations, des mouvements de petite amplitude (mouvement de 1 à 10 cm), des inclinaisons de grande amplitude (hexapode) et des rails de grande amplitude.

Le système le plus communément utilisé est la plateforme Stewart, ou plateforme

9. L'oscillopsie est la perception erronée d'une instabilité de la scène visuelle.
10. Les degrés de liberté sont la décomposition du mouvement dans l'espace en 6 transformations géométriques : 3 translations et 3 rotations.

dite 6 axes en référence aux 6 degrés de liberté qu'offre celle-ci. Ce système est composé de deux plateformes (une fixe et une mobile) reliées entre elles par six vérins suivant le modèle ci-dessous (figure 2.35). Afin d'augmenter les débattements longitudinaux et/ou latéraux, la plateforme peut être elle-même montée sur un système de rails linéaires de plusieurs mètres (similaire au simulateur Ultimate). Cette configuration, à 8 degrés de liberté (plateforme 6 axes + 2 axes de déplacement des rails), est particulièrement prisée en simulation automobile car elle permet de bien s'adapter aux stimulations à restituer. Récemment, les nouveaux simulateurs dynamiques hautes performances adoptent de plus en plus une configuration à 9 degrés de liberté. Similaire à la configuration précédente, elle ajoute une plateforme de rotation de lacet.

FIGURE 2.35 – Exemple de plateforme 6 axes

Cependant, ces configurations sont plutôt réservées aux grands simulateurs au vu de leur couts et de leur encombrement. Il existe toutefois beaucoup d'autres configurations de système de restitution de mouvement. Pour les petits simulateurs en particulier, on retrouve fréquemment des plateformes équipées de 3, voire 4, vérins permettant de faibles débattements de mouvements, mais permettant de reproduire des vibrations ou les à-coups (*jerk*[11]).

Ces plateformes mobiles, ne pouvant pas reproduire tous les types de mouvements ou encore des débattements limités, sont donc pilotées par un algorithme MCA (motion cueing algorithm). Ces algorithmes ont pour but de maximiser les restitutions inertielles au conducteur tout en respectant les limites du système de mouvement. Afin de maximiser la restitution, ces algorithmes utilisent les limites des sens humains, par exemple en se déplaçant sous les seuils de perception ou en utilisant l'ambigüité gravito-inertielle.

Un système de restitution de mouvements, en plus d'améliorer l'immersion du conducteur, lui octroie un meilleur contrôle du véhicule ainsi qu'une meilleure appréciation de

11. le *jerk* (ou vecteur d'à-coups) est la dérivée du vecteur accélération par rapport au temps.

sa vitesse et de ses accélérations [Reymond et al. 1999]. De plus, ces dispositifs réduisent les possibles conflits sensoriels entre le système vestibulaire et visuel.

CHAPITRE 3

LE MAL DU SIMULATEUR

Documenté dès 1957 dans des rapports militaires sur des entrainements en simulateur de vols d'hélicoptère, le mal du simulateur a toujours été un défi pour la recherche sur les simulateurs immersifs. De plus, aujourd'hui, de nombreux simulateurs de conduite sont utilisés pour effectuer de la recherche, des formations ou des validations de conception. Les conséquences et les implications pour la validité de la simulation peuvent être sévères si elles ne sont pas contrôlées et prises en compte [Casali 1985]. En effet, le mal du simulateur peut entrainer toute une série de symptômes, notamment des troubles de la tension, maux de tête, instabilité posturale, transpiration, désorientation, vertiges, pâleur, nausées et vomissements [Ebenholtz 1992 ; Pausch et al. 1992]. Le mal du simulateur peut ainsi affecter les performances du conducteur de diverses manières négatives en raison de comportements inappropriés, d'une perte de motivation, de l'évitement de tâches jugées dérangeantes et d'une source de distraction.

3.1 Les cinétoses et le mal du simulateur

Le mal des simulateurs est une variante du mal des transports qui est couramment ressentie par les participants dans les simulateurs de vol ou les simulateurs de conduite. Puisque les termes mal des transports, mal de mer, mal des simulateurs, etc. font partie d'une même famille, ils sont caractérisés par un ensemble de symptômes similaires, appelée les cinétoses ou mal du mouvement.

3.1.1 Définition des cinétoses

Il y a plus de deux-mille ans, le médecin grec Hippocrate observait déjà que « naviguer sur la mer prouve que le mouvement perturbe le corps » [J. Reason et Brand 1975]. En effet, le terme « nausée » dérive du mot racine grec « naus » signifiant un navire, ayant donné le terme « nautique ». Cependant, ces dernières années, l'innovation dans les transports et l'industrie a étendu la gamme d'environnements à mouvements provocateurs, avec la voiture et l'avion, mais aussi l'apesanteur, la réalité virtuelle et les simulateurs immersifs.

Le mal du mouvement, ou cinétose, est une condition caractérisée par un ensemble de réactions physiologiques se présentant sous forme de différents symptômes (maux de têtes, nausées, pâleur, etc.). Cette condition se décline suivant plusieurs variantes avec leurs propres spécificités en fonction de l'environnement provocateur, comme le mal de mer, de l'air ou en voiture (cf figure 3.1). En dépit de la diversité apparente des environnements, il existe cependant des caractéristiques communes dans la nature des stimulus provocateurs ainsi que dans les symptômes. C'est pourquoi le pluriel est généralement employé lorsque l'on parle de cinétoses.

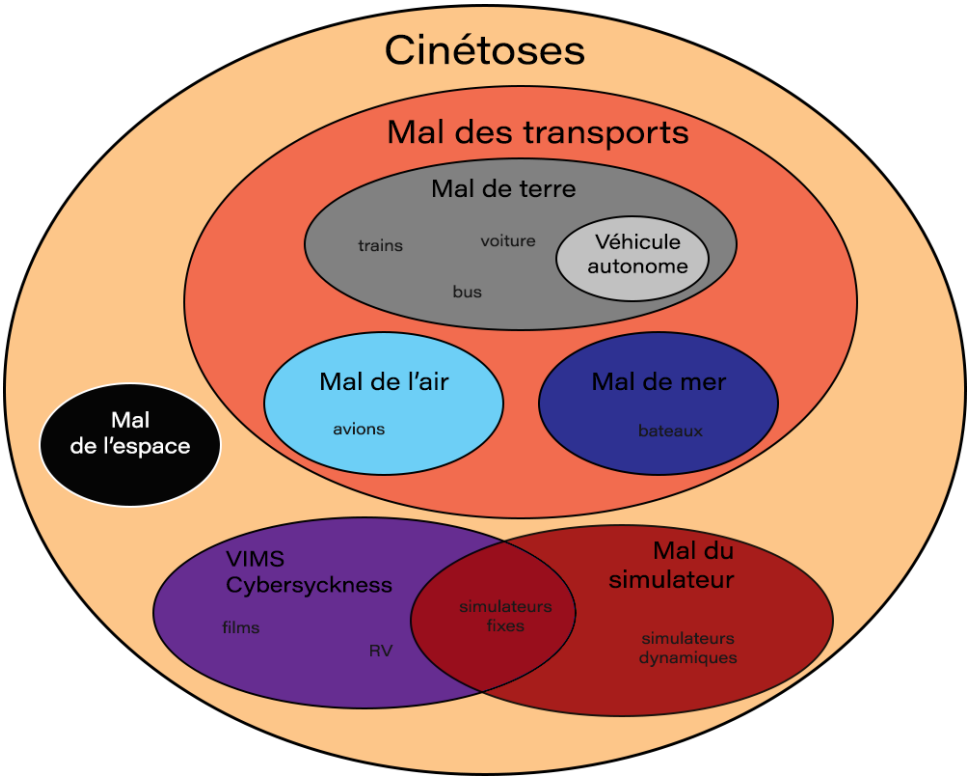


Figure 3.1 – Les différentes cinétoses

Toutefois, celles-ci ne sont pas nécessairement liées à un mouvement physique comme pour le mal des transports (cf figure 3.1). Les cinétoses peuvent également résulter d'un mouvement virtuel ou apparent [Hettinger et Riccio 1992], comme c'est le cas pour le mal du simulateur ou de la réalité virtuelle. En effet, une scène visuelle est une stimulation suffisante, mais non nécessaire, pour créer des cinétoses. Des études ont montré que l'on

pouvait aussi être malade avec seulement une restitution visuelle [M. E. McCauley 1984], un film avec un large champ de vision et des déplacements de caméra peut ainsi engendrer des cinétoses [Griffin 1990].

Avec une sensibilité variable, la plupart des individus, et certains animaux dont les mammifères, souffrent des cinétoses à leur manière, à l'exception près des personnes sans système vestibulaire fonctionnel qui se sont révélées insensibles aux mouvements physiques et visuels [J. F. Golding 2006b ; J. Reason et Brand 1975 ; J. R. Lackner 2014].

3.1.2 Différents types de cinétoses

Ainsi, les environnements cinétogènes peuvent être très variés, présentant chacun leurs stimulus propres (cf figure 3.1). À ce titre, les cinétoses peuvent être divisées en trois catégories suivant le type de stimulus provocateur :

1. Les cinétoses causées par un mouvement ressenti, mais non vu. Le mouvement est donc perçu principalement par le système vestibulaire, mais aucun mouvement n'est détecté par le système visuel. Ce type de cinétoses se retrouve particulièrement dans les transports, comme le mal de mer, de l'air ou en voiture. En effet, les mouvements du véhicule sont perçus par le système vestibulaire alors que les yeux perçoivent le véhicule comme étant fixe.

2. Les cinétoses causées par un mouvement vu, mais non ressenti. Dans ce cas, le mouvement est détecté par le système visuel, mais le mouvement n'est pas perçu par le système vestibulaire. Les cinétoses apparaissant dans ces cas sont appelées VIMS (visually induced motion sickness). Ces cinétoses sont apparues plus récemment avec les affichages (cinéma, écrans, etc.) et se sont répandues avec leur expansion, particulièrement avec la réalité virtuelle ou les simulateurs fixes. Dans cette catégorie se retrouve le cas particulier du mal de l'espace [Benson 2002 ; J. R. Lackner 2014] où le système vestibulaire est rendu inefficace en apesanteur par l'absence de force de gravité. Cette cinétose, alors inconnue à l'époque des premiers vols spatiaux, est à l'origine de modifications de missions.

3. Les cinétoses causées lorsque les systèmes perceptifs détectent des mouvements qui ne correspondent pas. Cette catégorie s'illustre parfaitement avec le mal du simulateur dans le cadre des simulateurs dynamiques : les mouvements de la plateforme ne correspondent pas forcément aux mouvements visuels, en raison des limites des systèmes de mouvement ainsi qu'aux désynchronisations possibles.

Comme étudié par la suite (cf. 3.3), ces différents types de stimulus ont ainsi des manifestations variées de symptômes.

3.1.3 Le mal du simulateur

Ainsi qu'abordé précédemment, le mal du simulateur est un cas particulier de cinétose. Il a été découvert avec l'arrivée des premiers simulateurs immersifs, avec notamment des premières mentions dans des rapports d'entrainement sur simulateur de vol d'hélicoptère [J. W. Miller et J. E. Goodson 1960 ; Casali 1985]. Pendant l'expérience, plusieurs sujets ont ressenti un malaise similaire au mal des transports. Certains ont même noté que l'inconfort semblait provenir du manque d'indices vestibulaires dus à la base fixe du simulateur. Des symptômes similaires ont ensuite été observés sur des simulateurs mobiles [Crowley 1987]. Cependant, dans ces premiers rapports, le phénomène a davantage été signalé comme un mal des transports ou le résultat d'une exposition à des mouvements du corps à basse fréquence.

Le mal du simulateur est souvent considéré être induit par une disparité entre le monde réel et le monde simulé [M. Draper 1998]. En effet, la simulation d'un environnement réel est nécessairement incomplète, car il est actuellement impossible de reproduire parfaitement toutes les informations disponibles dans l'environnement réel. C'est pourquoi se concentrer sur la simulation d'une sous-partie du réel à reproduire est une démarche qui vise à limiter les déformations de l'information au cours du processus de simulation.

Étant donné que des disparités existent nécessairement dans les environnements simulés, le mal du simulateur fait ainsi référence aux symptômes résultants d'une simulation inexacte, et non aux maux causés par la simulation correcte d'une expérience cinétogène [Pausch et al. 1992]. Tant que les caractéristiques des simulateurs ne correspondront pas aux attentes perceptuelles humaines, le mal du simulateur pourra être ressenti. Alors, si tous les aspects de la simulation correspondent exactement aux attentes de perception humaine, tout symptôme de malaise qui surviendrait serait ainsi dû davantage à un mal des transports.

Le mal du simulateur peut entrainer un large éventail de symptômes, allant des nausées jusqu'aux vomissements. Similaires à ceux du mal des transports, ils ne sont pas pour autant identiques. En effet, comme vu précédemment, le mal du simulateur n'est pas seulement dû aux mouvements physiques, mais aussi visuels [R. Kennedy et al. 1988] ainsi qu'à une non-concordance de ces stimulus. L'une des différences entre ces deux types de cinétoses réside dans la proportion d'individus qui développent certains symptômes [Dizio et J. R. Lackner 1992]. En général, le mal des transports entraine beaucoup plus de nausées, voire de vomissements, que le mal du simulateur. Le mal du simulateur est davantage susceptible de provoquer des maux de tête, une fatigue oculaire et le syndrome de Sopite [1]. De nombreuses similitudes existent bien sûr, dépendant pour beaucoup des moyens spécifiques utilisés dans les deux cas de cinétoses.

Le mal du simulateur peut survenir pendant la simulation, mais aussi directement après la fin de celle-ci. Ces effets postérieurs à l'exposition à une situation cinétogène sont communément appelés mal du débarquement, correspondent souvent aux mêmes

1. Le syndrome de Sopite est un symptôme spécifique aux cinétoses, caractérisé par la sensation d'une grande fatigue, d'une difficulté à se concentrer ou à fournir des efforts, d'apathie, de faiblesse, de lourdeur, etc.

symptômes que ceux énumérés ci-dessus, dus à la réadaptation des sens au monde réel. Il a été démontré que ce processus varie en fonction du temps d'exposition au simulateur et du type de simulateur, mais nécessite en général jusqu'à 6h, voire 24h pour certains cas, pour s'atténuer [D. M. Johnson 2007 ; DeFlorio et Silbergleit 2006].

Les causes exactes du mal du simulateur sont encore aujourd'hui assez méconnues. De plus, différents éléments le rendent plus difficile à déchiffrer, tel que :

1. Tous ceux qui subissent la même simulation ne tomberont pas tous forcément malades.
2. Ceux malades présenteront une variété de symptômes différents et/ou avec des sévérités différentes.
3. De nombreux symptômes seront internes, non observables et subjectifs.
4. Les symptômes peuvent survenir sur une période de quelques minutes à plusieurs heures.
5. Certaines personnes peuvent présenter des différences de sévérité de symptômes d'un jour à l'autre. [Griffin 1990 ; M. McCauley et Sharkey 1992].

De toute évidence, de nombreuses variables influencent le mal du simulateur [Kolasinski 1995] et les variations qui en résultent rendent difficile l'identification des facteurs en cause. Par conséquent, cela rend son étude et son contrôle assez complexe.

3.1.4 Implications

Les conséquences et les implications du mal du simulateur sur la validité de la simulation peuvent être critiques si elles ne sont pas contrôlées et prises en compte [Casali 1985 ; Frank et al. 1988]. En effet, le mal du simulateur peut compromettre la validité des données issues de ces simulations, laisser des séquelles aux sujets après l'exposition, et interférer avec l'acquisition de compétences dans le cadre de la formation [Benson 2002].

Les cinétoses sont généralement considérées comme un problème de confort dans le domaine des transports. Cependant, dans le cas de la simulation de conduite, cela peut également affecter les performances de la tâche de conduite simulée [K. E. Money 1970 ; Uliano et al. 1986]. Le mal du simulateur affecte les performances de différentes manières, entrainant entre autres : l'apparition de comportements inappropriés (par exemple, la fermeture des yeux pendant des virages [Silverman et Slaughter 1995]), la perte de motivation, l'incapacité de se concentrer [R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987], l'évitement des tâches qui peuvent être dérangeantes, la modification des comportements afin de réduire les symptômes [Silverman et Slaughter 1995] et une attention focalisée sur l'apparition des premiers symptômes. Outre la dégradation des performances lors de la simulation, c'est aussi l'efficacité de celle-ci pour la formation qui peut être compromise. En effet, si ces comportements ne sont pas surveillés, gérés ou pris compte, la simulation peut entrer en conflit avec les cours théoriques et mener à l'apprentissage de mauvais réflexes [Benson 2002].

En plus des problèmes de validité créés par le mal du simulateur, il existe des effets négatifs pour les participants à la fois pendant et après une expérience. Ces effets incluent une réduction du temps d'utilisation, une diminution du plaisir, de la créativité, de l'apprentissage et de la productivité [M. Draper 1998]. Par ailleurs, ces effets sont davantage susceptibles de se produire lors de la première exposition à un simulateur ou lorsque des taux élevés de flux optique peuvent générer de la vection ou des changements fréquents d'accélération [Hettinger et Riccio 1992]. Il s'agit d'un défi majeur pour toutes les organisations qui souhaitent utiliser ou vendre de la simulation immersive (ou VR) et lesquelles de tels facteurs sont une composante importante de la tâche simulée qui ne peut être occultée.

De plus, les symptômes persistants ainsi que les effets postérieurs (mal du débarquement) peuvent avoir un impact sur les participants quelques temps après l'expérience de simulation. Ces séquelles ont ainsi des conséquences potentiellement graves pour la sécurité des participants qui tentent de reprendre certaines activités trop tôt après l'expérience. Ces symptômes peuvent inclure une vision trouble, des instabilités posturales, des nausées, des étourdissements et une gêne générale [D. M. Johnson 2005]. Les séquelles potentielles les plus dangereuses sont les perturbations du contrôle locomoteur et postural résultant de l'altération des boucles de contrôle sensorimoteur. Ces effets peuvent durer des heures, voire plus longtemps (de 6 à 24 heures [Pausch et al. 1992]), et, par exemple, affecter gravement la capacité à conduire une voiture ou tout autre véhicule. Les responsables de la simulation doivent prendre soin de comprendre l'impact de l'exposition à la simulation sur les participants et les protéger des dangers potentiels.

De cet ensemble d'effets négatifs résulte un immense défi pour toutes les organisations qui souhaitent utiliser ou vendre de la simulation immersive (ainsi que la VR) pour laquelle de tels facteurs sont une composante importante de la tâche simulée. En particulier les domaines militaires, industriels, médicaux et du divertissement ont un vif intérêt à essayer de réduire le mal du simulateur dans le but d'améliorer l'encadrement et la sécurité [Durlach et Mavor 1995]. Par conséquent, le mal du simulateur fait l'objet de nombreuses recherches, le plus souvent pour des applications militaires [Kolasinski 1995 ; D. M. Johnson 2005]. Malgré cela, ses origines restent encore assez méconnues et énigmatiques.

3.2 Théories

L'une des premières théories émise a été que le mouvement perturbait le sang et les viscères, engendrant ainsi nausées et malaises. Au début du siècle dernier, une autre théorie a émergé, selon laquelle les cinétoses étaient provoquées par une hyper-stimulation des systèmes vestibulaires. Cette hypothèse était confortée par les mouvements et forces inhabituelles des situations provocatrices (bateau, voiture, etc.). De plus, les symptômes ressemblaient fortement à ceux induits par des malformations ou des lésions vestibulaires, sans compter que les seules personnes immunisées étaient celles ne disposant pas de système vestibulaire fonctionnel [K. Money 1990].

Ces hypothèses ont été abandonnées dès qu'il a été constaté que des cinétoses pouvaient être induites seulement visuellement, sans aucun mouvement physique, suite à l'expansion des affichages numériques. Ces nouvelles cinétoses ont permis de réévaluer ces hypothèses sous un angle nouveau, et d'aboutir au développement des premières théories plus proches de la réalité incluant ces nouveaux environnements cinétogènes.

Il existe actuellement plusieurs théories derrière les concepts de cinétoses et/ou du mal du simulateur. Les trois théories les plus répandues sont : la théorie des conflits sensoriels et neuronaux, la théorie révolutionnaire d'intoxication et finalement celle de l'instabilité posturale. Plus récemment, il a été émis l'hypothèse que ce n'est pas un conflit des signaux en soi qui est responsable, mais plutôt un conflit dans le cadre de référence (ou de repos) qui ne correspond pas aux signaux.

3.2.1 La théorie des conflits neurosensoriels

La théorie du conflit sensoriel est sans aucun doute la théorie la plus acceptée actuellement concernant les cinétoses et, par extension, le mal du simulateur. Cette théorie, présentée pour la première fois par Reason et Brand en 1975 [J. Reason et Brand 1975], a ensuite été légèrement modifiée en 1978 par Reason [J. T. Reason 1978] en théorie des réarrangements sensoriels pour être plus juste. L'hypothèse principale de cette théorie, illustrée par la figure 3.2, est que le mal se produit en raison d'un conflit entre les perceptions des systèmes sensoriels. Ce conflit s'effectue tout particulièrement entre les modèles perceptifs, construits en fonction des expériences antérieures, et le motif sensoriel perçu. Cela provoque un conflit interne qui ne peut être résolu, entrainant ainsi une condition de réarrangement sensoriel et donc les symptômes associés aux cinétoses.

> *« [...] all situations which provoke motion sickness are characterized by a condition of sensory rearrangement in which the motion signals transmitted by the eyes, the vestibular system and the non-vestibular proprioceptors are at variance not only with one another, but also - and this is the crucial factor - with what is expected on the basis of past experience [...] »*
>
> — J. Reason et Brand [1975]

Des exemples représentatifs de ce conflit sont le simulateur à base fixe ou le casque de réalité virtuelle : les indices visuels induisent des mouvements au conducteur alors qu'aucun indice vestibulaire associé n'est perçu par celui-ci, et ce car il est immobile. Les conducteurs et passagers de véhicules réels ont appris à s'attendre à ce que les signaux visuels d'accélérations aient également un signal d'accélération vestibulaire correspondant. Par conséquent, un conflit sera détecté, déclenchant alors le mal du simulateur. Ce conflit se produit également dans les simulateurs dynamiques où les signaux visuels et vestibulaires restitués ne sont pas cohérents ou en décalage.

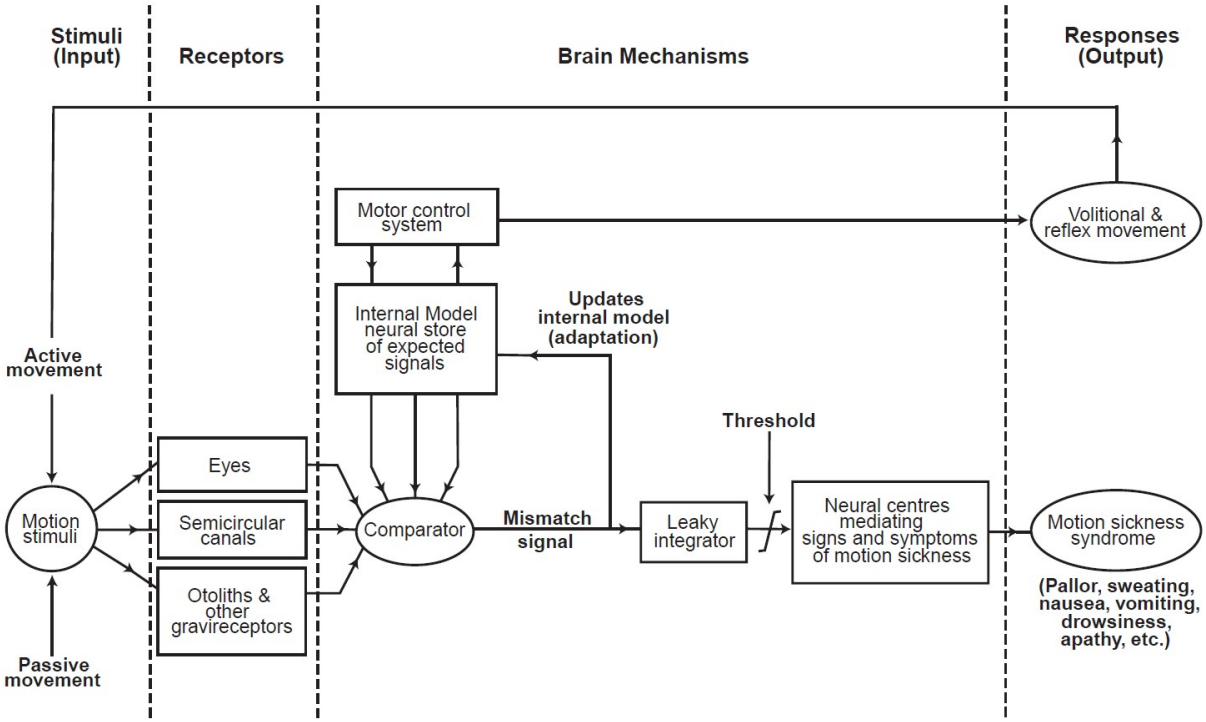


FIGURE 3.2 – Un modèle heuristique du contrôle moteur et des cinétoses basé sur la théorie du réarrangement sensoriel [BENSON 2002]

Il existe plusieurs types d'incohérences sensorielles qui peuvent entrainer des conflits sensoriels dans le cas des cinétoses. Premièrement, il existe deux grandes catégories de conflits [GRIFFIN 1990] :

- Intermodal : par exemple, un conflit entre les signaux perçus par les systèmes vestibulaire et visuel.
- Intramodal : par exemple, un conflit entre les signaux perçus par les canaux semi-circulaires et les signaux perçus par les organes à otolithes de l'appareil vestibulaire.

De plus, au sein de chaque catégorie, trois autres types de conflits peuvent survenir entre ces signaux [2] :

- Lorsque les deux signaux, « A » et « B », de deux systèmes de perceptions distincts, existent et fournissent des informations contradictoires ;
- Lorsque le signal A existe mais que le signal « B » est absent ;

2. Les désignations arbitraires « A » et « B » seront utilisées pour les deux signaux en conflit.

- Inversement, lorsque le signal « B » existe et que le signal « A » est absent.

La théorie suppose que toutes les situations cinétogènes peuvent être classées dans l'une des deux catégories ainsi que dans l'un des trois types de conflits, pour un total de six conditions différentes.

Bien que la théorie du réarrangement sensoriel ait été initialement développée pour le mal des transports, elle s'applique également aux autres cinétoses, dont le mal du simulateur. Cependant, dans le cadre du mal du simulateur, il est probable que la deuxième catégorie (conflits entre organes vestibulaires) ne joue pas un rôle majeur, bien que prépondérant dans le cadre du mal de l'espace. Par conséquent, le conflit prédominant est sans doute le conflit entre les signaux intermodaux perçus par le système visuel et les systèmes vestibulaires. De plus, le couplage entre ceux-ci est assez remarquable étant donné leur importance pour l'orientation spatiale et l'équilibre. Ensuite, les différents types de cinétoses cités ci-dessus (cf. 3.1.2) illustrent bien chacun des trois types de conflits pouvant survenir entre les systèmes visuel et vestibulaire.

De surcroit, cette théorie montre un lien avec l'expérience des individus (cf. figure 3.2). Premièrement, la tâche réelle effectuée en dehors du simulateur aura une incidence sur le mal observé lors de l'exécution de la même tâche dans un simulateur [Pausch et al. 1992]. Plus un sujet a d'expérience sur celle-ci, plus il est susceptible de ressentir des symptômes. Ces éléments abondent dans le sens de la théorie car plus l'opérateur est habitué à ce type de schéma de réponses sensorielles liées à la tâche, plus il sera susceptible de reconnaitre, inconsciemment voire consciemment, les incohérences lors de tâche simulée. Cela permettrait d'expliquer la faible sensibilité des enfants, encore en apprentissage des schémas sensoriels.

Deuxièmement, cette théorie du réarrangement sensoriel montre aussi un lien avec l'expérience de la tâche simulée, suggérant une habituation aux cinétoses. Les expériences en simulation renforceront l'accommodation à ce nouveau type schéma de réponses sensorielles en plus, ou à défaut, de ceux sollicités pour la tâche réelle [Crowley 1987 ; M. McCauley et Sharkey 1992]. Cela explique, par exemple, l'acclimatation des marins ou des astronautes aux conditions particulières de leur environnement et la disparition des symptômes après un certain temps. Cependant, cette adaptation peut générer un autre type de cinétose à leur retour sur la terre ferme : le « mal de débarquement » [DeFlorio et Silbergleit 2006 ; D. M. Johnson 2007]. Cette réadaptation ne durera toutefois que peu de temps en raison des habitudes sensorielles sur terre déjà acquises et stockées en mémoire, prêtes à être réactivées.

Même si la théorie des conflits sensoriels est la théorie la plus largement reconnue et acceptée pour l'explication et l'origine des cinétoses, elle pose cependant quelques problèmes. Ces derniers ont conduit certains à remettre en question son utilité comme modèle explicatif [Stoffregen et Riccio 1991], ce qui sera abordé par la suite (cf 3.2.3).

Le premier problème tient à ce que cette théorie ne permet pas de prédire efficacement les cinétoses du simulateur. En effet, cette théorie ne donne pas de formule fiable basée sur des mesures des indices sensoriels. Elle ne permet donc pas de déterminer avec précision les risques de cinétoses liés à une situation donnée, ou de prévoir la sévérité des symptômes [M. H. Draper et al. 2001 ; R. S. Kennedy et Frank 1985 ; Riccio et Stoffregen

1991 ; Kolasinski 1995 ; Stoffregen, Hettinger et al. 2000]. Même si elle semble juste, la théorie des conflits neurosensoriels, sous sa forme actuelle, ne peut pas être testée et validée [Ebenholtz et al. 1994]. Deuxièmement, selon cette théorie, une situation qui rentre dans l'une des configurations d'incohérence sensorielle énoncées plus haut (non-redondance de signaux cohérents) devrait générer des symptômes de cinétoses. Or, il existe des situations de conflit sensoriel évidentes et qui ne génèrent pas de malaise. Par exemple, les simulateurs à base fixe, où les signaux vestibulaires sont absents, ne rendent pas systématiquement malade.

Cette théorie n'explique pas non plus la différence de sévérité des symptômes entre la simulation active ou passive. En effet, les passagers sont généralement plus sensibles aux cinétoses que les conducteurs [Riccio et Stoffregen 1991], bien que tous deux subissent les mêmes stimulations physiques, et donc les mêmes conflits sensoriels. Enfin, il n'y a eu aucune explication physiologique de la raison pour laquelle le conflit sensoriel et neuronal entrainerait une réponse nauséogène. Il n'existe, d'autant plus, aucune voie de traitement neuronal connue qui pourrait expliquer une telle réponse et il est peu probable qu'il en existe une, encore non découverte à ce jour, dédiée à cette réponse particulière.

Cependant, malgré ses inconvénients potentiels, les données expérimentales actuelles tendent à soutenir cette théorie du réarrangement sensoriel, et elle reste aujourd'hui la théorie la plus largement acceptée. Toutefois, certains auteurs [Oman 1982 ; Droulez et Darlot 2018] ont par la suite essayé de proposer une modélisation plus mathématique des principes de cette théorie.

3.2.2 La théorie évolutionnaire d'intoxication

À travers la théorie évolutionnaire d'intoxication, Treisman [1977] tente de répondre à la question du lien entre les cinétoses et les symptômes nauséeux. Cette théorie cherche à expliquer les cinétoses d'un point de vue évolutif. Celle-ci revendique que les cinétoses ne sont qu'un effet secondaire dérivé d'un mécanisme évolutif de protection de l'organisme contre des toxines.

Dans le cadre d'une théorie évolutive, il existe deux manières d'expliquer un phénomène. Premièrement, le phénomène est avantageux pour l'espèce. Deuxièmement, le phénomène est un potentiel effet secondaire d'une caractéristique bénéfique [Treisman 1977]. Or, si aucune raison positive ne justifiait sa présence, la sélection naturelle aurait eu pour effet de l'éliminer par pression évolutive, particulièrement pour les espèces naturellement exposées à des environnements cinétogènes. Or, les cinétoses sont répandues chez l'homme, mais aussi chez un grand nombre d'espèces, allant des singes aux poissons [J. F. Golding 2006a ; K. E. Money 1970 ; J. Reason et Brand 1975]. Toutefois, les vomissements en réponse aux mouvements ne présentent pas d'intérêt de survie apparent et semblent désavantageux dans certaines conditions, par exemple, les singes malades dans les arbres soumis aux vents. C'est pourquoi cette théorie se penche sur la deuxième

explication évolutive.

Par ailleurs, un autre phénomène bénéfique ayant une réponse physiologique similaire est notre capacité de défense contre les toxines. À l'image du rejet par gout ainsi que la réponse émétique provoquée par les effets sur les parois de l'estomac ou des chimiorécepteurs appropriés, les cinétoses seraient le troisième niveau de défense contre les toxines (cf. figure 3.3). Ces défenses se présentent sous la forme de nausées puis de vomissements suite à des perturbations physiologiques qui auraient été produites par les toxines absorbées [Treisman 1977]. De surcroit, les contrôles moteurs proprioceptif et visuel constituent un système idéal de détection additionnel des effets initiaux de potentielles neurotoxines. Ces systèmes sont en effet complexes, presque continuellement en action, et très sensibles à des degrés mineurs de perturbation [K. Money 1990]. La plupart des toxines naturelles affectent le système nerveux et peuvent altérer les fonctions sensorielles et motrices.

> *« An emetic response to repeated such mismatches would be an advantageous adaptation for an unspecialized feeder which might ingest neurotoxins in vegetation or carrion.[] If this suggestion is correct, motion sickness is an adaptive response evoked by an inappropriate stimulus. »*
>
> — Treisman [1977]

Cette théorie avance que les perturbations sensorielles induites dans le cadre de situations cinétogènes, telles que la vision floue, la latence et les disparités sensorielles, sont similaires aux symptômes éprouvés à la suite d'une intoxication ou à l'ingestion de poison. Le fondement de cette théorie est que les effets des environnements provocateurs amènent le corps à croire qu'il a ingéré du poison, et que celui-ci réagit donc pour résoudre le problème. En d'autres termes, selon cette théorie, les cinétoses sont une réponse adaptative provoquée par un stimulus inapproprié [Treisman 1977].

Cette théorie a été testée expérimentalement, fournissant ainsi les preuves d'une réponse émétique réduite lors de la confrontation aux toxines après une ablation vestibulaire bilatérale [K. E. Money et Cheung 1983]. De plus, elle est également conforme aux observations, dans la mesure où les personnes les plus sensibles au mal des transports sont également plus sensibles aux toxines, à la chimiothérapie, aux nausées et aux vomissements postopératoires [Morrow 1985]. Cependant, de façon similaire à la théorie des conflits sensoriels et neuronaux, la théorie du poison a également été remise en cause [Crampton 1990]. Elle ne fournit aucun moyen de prédiction quant à l'apparition des symptômes : quand, où, à quelle vitesse les individus déclencheront une réponse émétique. Il n'en découle donc aucune recommandation évidente pour atténuer le malaise. En raison de ces limitations, il est difficile d'évaluer cette théorie. Elle peut, toutefois, être utilisée en complément de à la théorie des conflits de repères pour expliquer la réponse nauséogène[Oman 2011], comme montré par la figure 3.3.

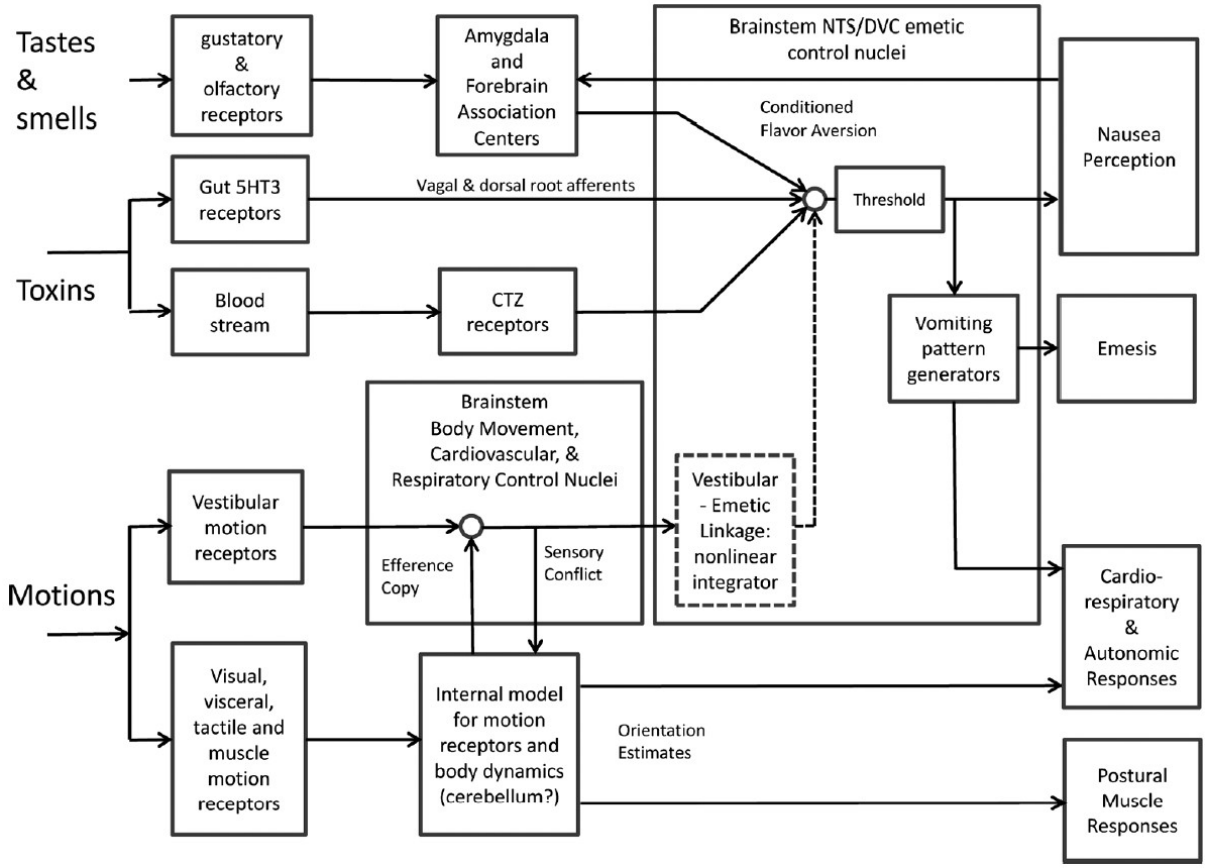


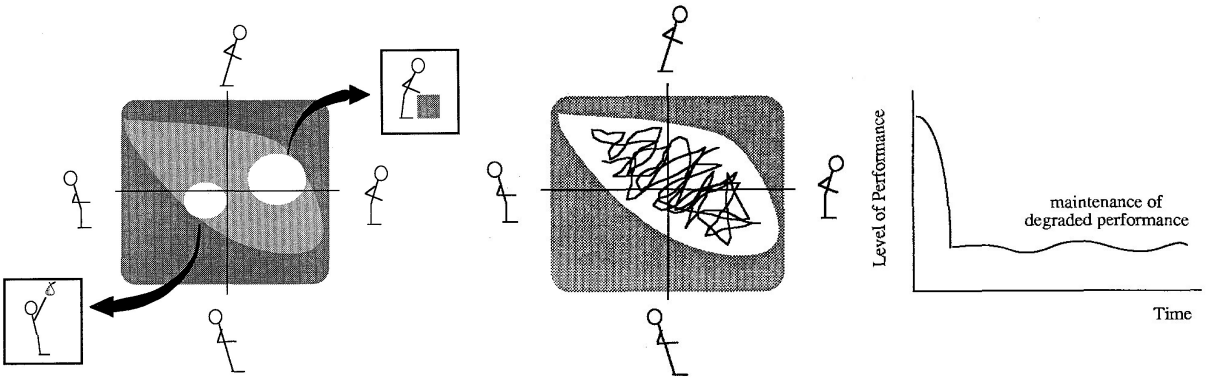
FIGURE 3.3 – Schéma des interactions et les mécanismes impliquer dans la théorie d'intoxication [OMAN 2011]

3.2.3 La théorie écologique de l'instabilité posturale

La théorie de l'instabilité posturale a été développée par Riccio et Stoffregen [RICCIO et STOFFREGEN 1991], d'abord comme une critique [STOFFREGEN et RICCIO 1991] puis en une alternative à la théorie des conflits sensoriels, et ce du point de vue de la psychologie écologique. Elle est centrée sur l'hypothèse que les systèmes sensoriels tentent constamment de maintenir la stabilité posturale dans notre environnement.

Cette théorie part de l'observation que le mal des transports était précédé par des augmentations des oscillations posturales. Or, cet effet ne peut être prédit par la théorie du conflit sensoriel. Il pourrait, au contraire, être la cause des cinétoses par notre incapacité à contrôler activement les mouvements posturaux du corps [STOFFREGEN et SMART 1998]. Ainsi, l'instabilité posturale prolongée serait à l'origine des symptômes des cinétoses et les précède.

La théorie de l'instabilité posturale est basée sur leurs précédents travaux, avec notamment la théorie écologique d'orientation et du système vestibulaire de [STOFFREGEN et RICCIO 1988]. L'hypothèse principale de cette dernière est que les systèmes sensoriels



(a) Configurations posturales (hanche/cheville) en fonction des interactions

(b) Contrôle adaptatif de la posture à un niveau de performance dégradé, la condition requise à l'apparition des cinétoses

FIGURE 3.4 – Schémas explicatifs de la théorie d'instabilité posturale [RICCIO et STOFFREGEN 1991]

tentent constamment de maintenir une stabilité posturale en fonction de notre environnement et de nos actions (cf. figure 3.4a). Ainsi, les objectifs de la perception et de l'action définissent les objectifs de toutes les actions contrôle, c'est-à-dire que le contrôle postural est estimé en fonction de ses conséquences pour les autres comportements. En d'autres termes, cela signifie que le comportement dépend de la posture et est inséparable de celle-ci [STOFFREGEN et RICCIO 1988]. L'instabilité posturale est donc un état dans lequel le corps tente de corriger et de minimiser la variance perçue par rapport aux états posturaux normaux [RICCIO et STOFFREGEN 1991]. C'est pourquoi la stabilité et la posture dépendent de l'environnement : on ne se tient pas de la même manière sur un sol dur que sur de la glace par exemple.

> *« [...] animals become sick in situations in which they do not possess (or have not yet learned) strategies that are effective for the maintenance of postural stability [] motion sickness results from prolonged instability in the control of posture. »*
>
> — RICCIO et STOFFREGEN [1991]

Les cinétoses surviennent lorsqu'un individu tente de maintenir sa stabilité dans un ensemble de nouvelles conditions environnementales alors qu'il n'a pas encore appris les stratégies pour accomplir la tâche. Ces situations de configurations perceptives inhabituelles génèrent des changements dans les types de couplage action-perception nécessaires au contrôle de postural (cf. figure 3.4b). Ainsi, serait générateur de cinétoses le fait de ne pas posséder encore les stratégies nécessaires au maintien de la stabilité posturale face à un nouvel environnement demandant une adaptation des boucles d'action-perception. Par exemple, les conducteurs expérimentés tombent malades en simulateur car il s'agit d'un nouvel environnement n'ayant pas les mêmes retours sensoriels que le réel, et où ils essaient, de plus, d'appliquer des compétences acquises sur la route.

À travers cette théorie, Stoffregen et Riccio affirment que l'instabilité posturale précède non seulement la maladie, mais qu'elle est également la source nécessaire à l'ins-

tallation des symptômes [Riccio et Stoffregen 1991]. En conséquence, plus la durée de l'instabilité posturale est longue et plus les symptômes seront sévères, cette causalité permettrait ainsi d'utiliser l'instabilité posturale comme un moyen de prédiction.

Suite à des expérimentations en véhicule ou sur des plateformes de mouvement, il a par ailleurs été observé que les cinétoses sont davantage susceptibles de se produire lorsque le mouvement périodique imposé se situe à des fréquences inférieures à 1 Hz. Cela entraine des interférences avec les oscillations naturelles du corps qui se situent dans les mêmes gammes de fréquences. D'autres études confortent les hypothèses de la théorie, en confirmant notamment l'antériorité de l'instabilité posturale ainsi que la relation avec la sévérité des symptômes en fonction de l'amplitude et de la durée des oscillations [Stoffregen, Faugloire et al. 2008 ; Stoffregen, Hettinger et al. 2000 ; Villard et al. 2008 ; Smart et al. 2002].

Cette approche théorique permet de fournir des éléments d'explication au phénomène d'adaptation, à mesure que l'individu apprend de l'environnement. De plus, elle justifie les différences interindividuelles en prenant en compte les activités individuelles et non la stimulation sensorielle. Cependant, cette théorie est assez critiquée [J. E. Bos 2011 ; Bos, Jelte E. 2015]. Premièrement, elle n'apporte aucune explication sur le lien entre le manque de stabilité posturale et la réponse émétique, si ce n'est en adaptant l'hypothèse évolutive d'intoxication. De plus, elle ne décrit pas pourquoi certains environnements provoqueraient une instabilité posturale tandis que d'autres ne le feront pas. De même, des environnements où les mouvements posturaux sont limités (par exemple, allongé, le siège de voiture) ne rendent pas, pour autant, moins malade [Flanagan et al. 2004 ; Neimer et al. 2001]. Pour finir, la présomption selon laquelle l'instabilité posturale précède le mal du simulateur et qu'elle pourrait être en être la cause n'est pas toujours valide [R. S. Kennedy et Stanney 1996 ; Gower et al. 1988], et l'instabilité posturale serait ainsi plutôt un symptôme prodromique (précurseur).

3.2.4 L'hypothèse du cadre stationnaire

Plus récemment, une nouvelle théorie s'est démarquée : l'hypothèse du cadre stationnaire ou référentiel de repos ("rest frame hypothesis")[Prothero 1998 ; Prothero 1998 ; Prothero, M. H. Draper et al. 1999]. Celle-ci présente une explication cognitive pour la théorie du conflit sensoriel, suggérant plutôt un conflit dans la perception spatiale qu'entre les signaux pour expliquer les cinétoses.

Cette théorie résulte du constat que l'être humain présente une prédisposition particulière pour définir son environnement comme référence stationnaire. Prothero, M. H. Draper et al. [1999] définissent alors les cadres de repos comme le cadre de référence particulier (un système coordonné utilisé pour définir les positions, les orientations angulaires et les mouvements) qu'un observateur donné prend pour être stationnaire, en grande partie afin de réduire les calculs de mouvement relatif [Prothero 1998]. C'est-à-dire que l'humain cherche à s'ancrer mentalement sur une référence de repos, ce qui va déterminer la perception des mouvements relativement à cette référence. Ainsi, un

ponton flottant peut être pris comme référence stable par l'observateur qui s'y promène, mais perd ce statut de cadre stationnaire dès lors que celui-ci touche un pieu fixé au sol sur lequel coulisse le ponton [Gurfinkel et Levik 1993]. Sur terre, le cadre de référence stationnaire est principalement basé sur la pesanteur, notre environnement visuel, et les contacts (pieds, mains, etc.).

> *« [Rest frames are defined as] the particular reference frame (a co-ordinated system used to define positions, angular orientations and motions) which a given observer takes to be stationary. »*
>
> — Prothero, M. H. Draper et al. [1999]

Selon cette hypothèse, le cerveau utilise les indices sensoriels pour former un modèle interne de ce qui est stationnaire et, par conséquent, les conflits avec celui-ci pourraient générer des cinétoses. Cela signifie, entre autres, que les cinétoses ne sont pas physiquement induites par des signaux contradictoires. Mais elles sont plutôt induites mentalement par un conflit de cadres stationnaires déduits des indices perceptifs, créant ainsi un conflit cognitif et non sensoriel [Prothero 1998 ; Prothero, M. H. Draper et al. 1997 ; Prothero, M. H. Draper et al. 1999]. Ainsi, par exemple, si le participant est installé dans un simulateur à base fixe, le cadre de stationnaire est défini par les éléments de la pièce qui l'entoure. Le participant rentre alors en conflit avec le cadre défini par les affichages du monde virtuel.

Le système nerveux central prend généralement comme cadre de repos ce qu'il perçoit de plus éloigné dans le champ visuel. C'est pourquoi les auteurs supposent que l'implémentation d'un fond visuel cohérent avec les signaux inertiels perçus pourrait réduire les cinétoses. Afin de tester leur hypothèse, Prothero, M. H. Draper et al. [1999] ont demandé aux participants de porter un casque de réalité virtuelle pouvant afficher un fond visuel indépendant par transparence. Le fond visuel étant le mur du laboratoire, il était cohérent à la perception inertielle des sujets. Les participants ont ainsi rapporté moins de troubles posturaux et de symptômes de cinétoses lorsque le fond indépendant était visible. La sensation de vection étant peu affectée par l'affichage, ce dispositif pourrait permettre de diminuer les cinétoses, mais cela au détriment de l'immersion. Des études complémentaires ont été ensuite menées afin de mieux comprendre le rôle de ce fond visuel indépendant et d'étendre les résultats précédents, notamment : son effet en fonction de la fréquence [Duh, Abi-Rached et al. 2001], ou de la luminosité [Duh, D. E. Parker et al. 2001] et finalement en fonction de son apparition en vision centrale ou externe [Duh, D. E. Parker et al. 2004]. Ces études ont montré que les fonds visuels indépendants réduisent les instabilités posturales associées aux cinétoses tout en étant en cohérence avec la théorie.

Néanmoins, malgré une approche cognitive, cette théorie n'explique pas non plus le lien avec les symptômes des cinétoses si elle n'est pas couplée avec la théorie d'intoxication. De plus, même si l'on sait que ce fond visuel indépendant a peu d'impact sur le phénomène de vection, on ne connait pas en revanche les éventuels effets sur l'immersion ou sur la performance des sujets à la tâche simulée. De plus, cette technique de réduction des cinétoses semble surtout fonctionner sur l'instabilité posturale et dans le contexte ou le sujet et le fond sont statiques. De nombreuses questions subsistent encore sur cette

technique quant à ses effets autres que sur les cinétoses.

3.2.5 Les théories et hypothèses des réflexes oculaires

Lors de l'observation, les yeux disposent de deux mouvements réflexes afin de maintenir la scène visuelle stable et dans l'axe de la fovéa. Premièrement, le réflexe vestibulo-oculaire (RVO), qui tend à compenser les mouvements de la tête captés par le système vestibulaire afin de maintenir le regard fixé sur son objectif. Deuxièmement, le réflexe opto-cinétique (ROC), qui tend à suivre du regard un objet ou la scène visuelle en mouvement en fonction du défilement rétinien. Le ROC et le RVO sont des réflexes (des mouvements réponses involontaires) qui agissent en synergie afin de produire une image rétinienne stable dans une variété de conditions de mouvements [Zacharias et Young 1981 ; Krauzlis 2013 ; Ebenholtz 2001].

Afin d'étendre et compléter la théorie du réarrangement sensoriel, Griffin [1990] présente la théorie des réponses réflexes. Selon lui, les mouvements des situations provocatrices sont sources de réflexes inappropriés ou conflictuels qui pourraient être associés aux cinétoses. Il propose que les réponses réflexes aux mouvements (y compris le réflexe vestibulo-oculaire) soient incluses à la théorie de Reason pour « fournir une plus grande visibilité des facteurs causaux et des mécanismes associés ».

Ebenholtz et al. [1994] ont également proposé une alternative à la théorie du réarrangement sensoriel. Cependant, leur hypothèse est que les cinétoses seraient induites par des combinaisons inappropriées de mouvements oculomoteurs. En effet, il existerait un lien direct entre la fonction vestibulaire et les réponses vagales par afférences musculaires extraoculaires. A ce titre, par exemple, le maintien extraoculaire pendant la chirurgie du strabisme peut provoquer à la fois des vomissements et l'apparition du réflexe oculo-cardiaque. Par conséquent, les symptômes du mal du simulateur seraient induits par des combinaisons inappropriées de mouvements oculomoteurs. Ces dernières provoqueraient alors une traction musculaire extraoculaire anormale et engendreraient une réponse vagale grâce à ce lien direct avec la fonction vestibulaire. De plus, il a été démontré qu'une réduction des nystagmus (mouvements réflexes de l'œil) induisait une réduction des symptômes de mal des transports [R. M. Stern et al. 1990].

> *« VOR adaptation is a physiological process that is directly driven by visual-vestibular mismatches. [] subjects often experience dizziness, postural ataxia, nausea and other motion sickness symptoms during adaptation to the altered visual-vestibular stimulus. »*
>
> — M. Draper [1998]

Enfin, un autre lien potentiel entre les réflexes oculaires et les cinétoses est l'adaptation du RVO. Ce processus d'adaptation du RVO est fréquemment marqué par des symptômes similaires aux symptômes des cinétoses, tels que la fatigue oculaire, les maux

de tête et les vertiges [Demer et al. 1989 ; Istl-Lenz et al. 1985 ; Paige et Sargent 1991]. En effet, l'adaptation du RVO génère des oscillopsies, une perception d'instabilité de la scène visuelle [Demer et al. 1989], provoquant un glissement rétinien qui conduit à des conflits sensoriels et donc à un réarrangement sensoriel des repères visuels et vestibulaires [M. Draper 1998]. C'est le cas, par exemple, pour des modifications visuelles, telles que des optiques grossissantes[M. Draper 1998] ou des prismes d'inversement de la vision [Shupak et al. 1990]. Dès lors, le RVO adaptera ses gains pour correspondre aux mouvements oculaires requis par la situation afin de stabiliser l'image dans les conditions modifiées. Cependant, le RVO étant inadapté aux nouvelles conditions, cela conduit à un glissement d'images sur la rétine ainsi qu'une situation de réarrangement sensoriel, provoquant par conséquent le développement des symptômes de cinétose. La durée et l'intensité des adaptations du RVO montrent une corrélation avec la sévérité des symptômes [M. Draper 1998]. Cette situation d'adaptation du RVO est particulièrement observable dans le cas de la réalité virtuelle, notamment dû à la latence d'affichage et du tracking. En effet le RVO doit s'adapter à ces nouvelles conditions entre les interaction du mouvement visuel et vestibulaire [Demer et al. 1989 ; Istl-Lenz et al. 1985 ; Paige et Sargent 1991].

Ces théories et hypothèses sont surtout répandues dans les situations avec des interfaces virtuelles (réalité virtuelle, écran 3D, simulateur), car elles sont les plus à même de générer cette condition d'adaptation du réflexe vestibulo-oculaire. Les grandes lignes des principales théories et hypothèses de leurs origines ont ici été exposées, elles seront cependant plus largement abordées dans le chapitre 6. Ce chapitre s'attardera plus en détails sur leurs explications et implications, particulièrement sur leur étude dans le cas de la simulation de conduite en simulateur dynamique.

3.2.6 La théorie de la verticale subjective

Une autre variante de la théorie du réarrangement sensoriel a été proposée par Bos et son équipe [J. Bos et Bles 1998]. Ils proposent de redéfinir la théorie du conflit sensoriel en spécifiant que les conflits sont, en fait, des conflits par rapport à la verticale subjective. D'après les auteurs, le seul conflit pouvant mener à des cinétoses serait celui généré par des situations où la verticale détectée (basée sur les informations sensorielles visuelles, vestibulaires et proprioceptives), est en désaccord avec la verticale subjective, interne, basée sur les expériences passées [Bles et al. 1998]. L'origine des cinétoses serait, de ce fait, de nature cognitive et non sensorielle. Le modèle de cette théorie permet une évaluation quantitative des cinétoses à travers le vecteur de différence entre les deux verticales, détectée et subjective. Celui-ci peut être vu comme une extension du modèle quantitatif de Oman [1982], à la seule différence qu'il ne concerne que le conflit de la verticale subjective.

Ces chercheurs ont par la suite validé leurs hypothèses grâce à des tests en centrifugeuse [De Graaf et al. 1998]. Ces hypothèses proposent ainsi une dissociation entre la verticale perçue à partir des informations inertielles et la verticale subjective admise habituellement par les informations visuelles de la cabine. Ils ont ensuite étendu leur théo-

rie pour s'adapter à davantage de situations provocatrices (en micro- ou hypergravité, en transport, en simulateur de conduite, etc.). Par ailleurs, dans le cas de la simulation de vol ou de conduite, ce qui conduit au mal du simulateur tient au fait que le simulateur ait des possibilités de débattement limitées, et ne puisse donc pas toujours simuler une verticale perçue concordante à la verticale subjective. De même, le cas d'une mauvaise concordance temporelle, visuelle, et physique du simulateur générerait le mal du simulateur.

Toutefois, des recherches complémentaires sont nécessaires pour valider ces hypothèses, encore souvent limitées à des comparaisons qualitatives, et qui, de plus, n'expliquent pas encore toutes les situations provocatrices.

3.2.7 Conclusion sur les théories

Compte tenu des différentes théories précédentes ainsi que celles non développées ici, par exemple celle du réflexe cardio-vestibulaire [Yates et al. 1998 ; Balaban 1999], il ne semble pas exister actuellement de théorie faisant consensus sur l'origine et l'explication des cinétoses. Cependant, la théorie du réarrangement sensoriel est sans aucun doute la théorie la plus utilisée et permet de fournir une explication qui semble correspondre le plus aux expérimentations et observations. Les conflits et réarrangements sensoriels peuvent, en effet, être identifiés dans presque toutes les situations générant des cinétoses. De plus, cette théorie inclut le rôle important de l'adaptation au phénomène, l'apprentissage réduisant les symptômes. Par ailleurs, cette théorie s'étoffe avec la plupart des nouvelles théories et semble combler ces lacunes (c.-à-d., verticale subjective, évolutionnaire, réflexes...).

La théorie de l'instabilité posturale est venue proposer une critique constructive de cette théorie en avançant que l'instabilité posturale précédait la maladie et en était même la cause. Même si cette théorie est assez critiquée, elle n'est pour l'instant pas réfutable. De plus, elle permet également de mettre l'accent sur le rôle important du comportement et des interactions par rapport à l'environnement comme source de symptômes.

Les différentes théories et hypothèses liées au réflexe vestibulo-oculaire permettent d'apporter une piste complémentaire à l'étude des cinétoses, spécifiquement dans le cas des environnements virtuels. L'adaptation du RVO à l'interface virtuelle est une hypothèse validée quant au déclenchement de symptômes de cinétoses, mais ne semble pas être le seul déclencheur, surtout dans des situations cinétogènes où il n'y a pas d'adaptation de celui-ci.

Contrairement aux précédentes, la théorie évolutionnaire d'intoxication s'intéresse non pas à l'origine du déclenchement des cinétoses, mais plutôt au lien avec les symptômes vagaux. Cela en fait une théorie pouvant être adaptée et rendue complémentaire aux autres précédemment citées.

Finalement, bien qu'aucune de ces théories n'explique pleinement les phénomènes du mal du simulateur, il nous semble plus juste d'adopter une approche systémique et pragmatique pour la simulation de conduite DIL. C'est-à-dire, en cherchant à créer des

simulateurs ainsi que leurs sous-systèmes, des scènes et des scénarios qui, dans le contexte de chaque théorie, minimiseront les symptômes du mal du simulateur. C'est pourquoi, dans la partie suivante seront abordés les différents facteurs identifiés pouvant influer sur le mal du simulateur.

3.3 Facteurs et effets

Les différentes théories exposées précédemment laissent sous-entendre la complexité de l'étude du phénomène de mal du simulateur. Cette complexité est en grande partie due au caractère polysymptomatique et polygénique de celui-ci. C'est-à-dire que le mal du simulateur présente une grande variété de symptômes différents, allant des simples nausées aux vomissements, mais comprenant aussi des symptômes moins perceptibles. De plus, cette maladie trouve ses origines dans une grande variété de causes, d'environnements ou bien est influencée par un ensemble de facteurs. Cependant, un avantage à cela est que les différences dans la symptomatologie auront une signification dans le diagnostic [R. S. Kennedy et Fowlkes 1992] permettant une identification des causes potentielles.

3.3.1 Effets liés au mal du simulateur

Comme énoncé précédemment, le mal du simulateur est polysymptomatique. En d'autres termes, celui-ci présente une large gamme de symptômes pouvant avoir une incidence sur la simulation, mais aussi des effets après l'exposition.

Symptomatologie

Les principaux symptômes observés lorsqu'une personne est victime du mal du simulateur sont les suivants [Kolasinski 1995 ; R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987 ; Benson 2002] :

- **Symptôme majeur :**

  Vomissements

- **Principaux symptômes :**

  Augmentation de la salivation, Nausée, Transpiration, Pâleur, Haut-le-cœur, Somnolence, Instabilité posturale, Syndrome de sopite [3]

- **Symptômes mentaux :**

  Difficulté de concentration, Confusion, Tête lourde, Dépression, Apathie, Anxiété

- **Symptômes visuels :**

  Mise au point difficile, Flashbacks visuels, Vision floue, Fatigue oculaire

- **Symptômes autres :**

3. Le syndrome de sopite est un trouble neurologique, un symptôme complexe spécifique aux cinétoses. Il est caractérisé par la sensation d'une grande fatigue, une difficulté à se concentrer ou de faire des efforts, l'apathie, des faiblesses, des lourdeurs, etc.[Graybiel et Knepton 1976]

Accroissement des bâillements, Conscience de l'estomac [4], Chaleurs, Perte d'appétit, Rots, Manque de coordination, Envie de déféquer, Maux de tête, Vertiges, Sécheresse de la bouche, Aérophagie, Flatulences, Vertige, Sueurs froides, Modification de la fréquence et la tension cardiaque, Fatigue générale, Peur

Le mal du simulateur peut induire encore d'autres symptômes moins visibles comme des pertes de chaleur [Nobel et al. 2012] ou encore des modifications hormonales [Benson 2002]. Cependant, les symptômes précédents sont les plus communs, visibles et ressentis par les sujets.

Lors d'une exposition à une situation provocatrice d'une intensité et d'une durée suffisantes, le développement des symptômes des cinétoses suit une séquence plus ou moins ordonnée, bien qu'il existe une grande variabilité individuelle non négligeable quant à la sévérité des différents symptômes [K. E. Money 1970 ; Harm 1990]. Ce modèle de réponse [Benson 2002], évoqué par la suite, a tendance à être cohérent et invariant de l'environnement provocateur [Cowings 1990] pour les symptômes principaux. Les environnements virtuels, comme la VR ou les simulateurs, amènent d'autres symptômes liés à leurs spécificités, comme la fatigue oculaire et la vision floue. Ces symptômes, assez proches des autres cinétoses, sont souvent compris dans le mal du simulateur ou le mal de réalité virtuelle et peuvent difficilement être isolés.

Le premier symptôme des cinétoses est généralement une sensation inconnue d'inconfort abdominal (principalement épigastrique), mieux décrit par le terme « conscience de l'estomac ». Au fur et à mesure de l'exposition, le bien-être se détériore avec l'apparition des nausées, souvent précédées de bouffées de chaleur et d'un besoin d'air frais. Certains sujets peuvent souffrir de rougeurs cutanées (dues à la vasodilatation), mais le plus souvent une pâleur s'installe avec des sueurs froides, étant annonciateur des vomissements à venir. La pâleur est surtout apparente dans la zone faciale, reflétant une activité accrue du système nerveux sympathique (cf. figure 3.5). La transpiration, autre réponse autonome de ce système, présente une activité en augmentation irrégulière avec des paliers d'activités sudomoteurs qui ont tendance à accompagner chaque vague de nausée [J. F. Golding 1992]. Les vomissements peuvent apporter un certain soulagement des symptômes, mais, dans le cas d'une exposition continue, les nausées augmentent à nouveau et ce jusqu'aux nouveaux vomissements. Ce schéma cyclique des symptômes croissants, décroissants et des vomissements récurrents peut durer plusieurs jours en cas d'exposition continue, comme dans des conditions de tempête en mer ou de vol spatial. La plupart des personnes s'adaptent néanmoins au mouvement et finissent par ne plus présenter de symptômes après 2 à 3 jours [J. Reason et Brand 1975].

En plus des signes et symptômes principaux des cinétoses, on retrouve un certain nombre d'autres symptômes qui surviennent fréquemment, sinon systématiquement [Benson 2002]. Le mal de tête est un symptôme pouvant survenir avant les autres, il est généralement de distribution frontale et peut être accompagné d'un étourdissement. D'autres symptômes précoces sont une augmentation de la salivation, des éructations, des flatulences, des changements du rythme respiratoire accompagnés de soupirs et de bâille-

4. L'expression « conscience de l'estomac » est habituellement utilisée pour désigner un sentiment d'inconfort gastrique sans nausée.

ments. Une hyperventilation se produit parfois, en particulier chez les individus anxieux et inquiets de l'environnement provocateur. Des changements plus importants dans l'état de comportement sont l'apathie et la dépression qui peuvent accompagner les cinétoses graves et rendre les victimes incapables, ou peu disposées, à accomplir les tâches attribuées ou même à prendre des mesures de base pour assurer leur sécurité [Benson 2002].

En plus des symptômes ressentis par les personnes souffrant du mal des transports, il existe des changements dans les fonctions physiologiques qui reflètent une altération de l'activité du système nerveux autonome (cf. figure 3.5) [K. E. Money 1970 ; Hu, McChesney et al. 1999]. La motilité et le tonus de l'estomac et de l'intestin diminuent et les bruits intestinaux ont tendance à disparaitre. L'activité électrique de l'intestin, mesurée par électrogastrogramme (EGG), montre une réduction d'amplitude et une augmentation du rythme électrique de base sur les sujets subissant des cinétoses. L'augmentation de la fréquence de l'activité électrique observée sur l'EGG, appelée tachygastrie [R. Stern et al. 1985], est en corrélation avec la gravité des symptômes et est associée à une diminution de la motilité gastrique. Les modifications cardiovasculaires sont principalement dues aux modifications du tonus vasomoteur [W. Johnson et al. 1993]. La pâleur causée par la vasoconstriction des vaisseaux cutanés s'accompagne d'une vasodilatation des vaisseaux plus profonds. Une élévation modeste de la fréquence cardiaque et de la tension artérielle peut être observée, mais ces changements sont variables et idiosyncratiques et ne sont pas fortement corrélés au niveau de malaise.

Les phénomènes de cinétoses sont aussi associés à une excrétion accrue des hormones hypophysaires antérieures et postérieures (cf figure 3.5). La plus prononcée est l'élévation de l'hormone antidiurétique (ADH) [Benson 2002], responsable de l'oligurie qui accompagne les symptômes de cinétoses. D'autres hormones hypophysaires, dont notamment l'hormone adrénocorticotrope, l'hormone de croissance et la prolactine, sont également augmentées [Eversmann et al. 1978], bien que négligeable par rapport à l'ADH. La modification de la sécrétion des hormones hypophysaires, en particulier de l'ADH, est corrélée à la gravité des symptômes, que ce soit lors de la stimulation ou de la récupération. Les hormones surrénales, l'épinéphrine et la noradrénaline augmentent également et, à l'image de la réduction de l'hormone thyréostimulante, elles sont plutôt considérées comme une réponse au stress non spécifique.

Chaque cinétose détient sa spécificité dans la déclaration de ses symptômes ainsi que sa sévérité, due aux types de stimulus provocateurs différents. Spécifiquement, les simulateurs avec interfaces virtuelles ont tendance à développer davantage les symptômes visuels tels que la fatigue oculaire, la vision floue ou la difficulté à faire la mise au point [R. S. Kennedy, Lane et al. 1993 ; Kolasinski 1995]. Un des effets majeurs du mal du simulateur est l'ataxie, et donc de l'instabilité posturale [Kolasinski 1995], sans doute due à la nécessité de grandes adaptations visuo-vestibulaire dans ces environnements spécifiques [Thomley et al. 1986].

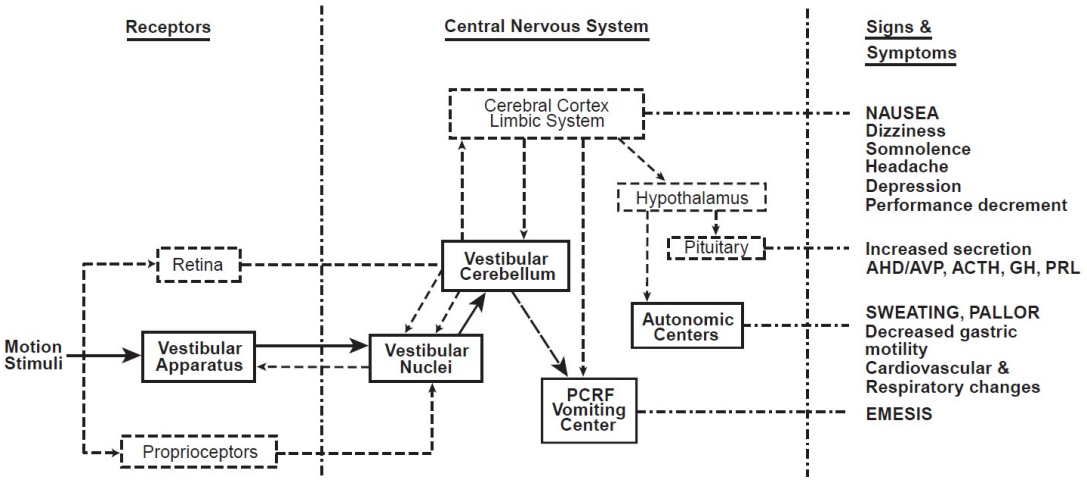


FIGURE 3.5 – Schéma des hypothétiques structures neurales impliquées dans le déclenchement des symptômes [ERNSTING et al. 1999]

Effets résiduels postérieurs

Les symptômes cités précédemment, bien que se déclarant lors de l'exposition à l'environnement provocateur, peuvent perdurer dans le temps après la stimulation cinétogène. Même si la plupart de ces symptômes se dissipent rapidement après l'exposition, des séquelles persistant pendant plusieurs heures ont été observées [BALTZLEY et al. 1989], et constituant donc un danger pour la sécurité. L'ataxie, la perte d'équilibre, les flashbacks, sont les séquelles qui représentent le plus de risques [J. W. MILLER et J. E. GOODSON 1960 ; M. MCCAULEY et SHARKEY 1992], surtout si la personne doit conduire un véhicule (terrestre ou autre) par la suite. Plus les symptômes ont été sévères à la sortie du simulateur, plus ceux-ci durent dans le temps [SILVERMAN et SLAUGHTER 1995]. Les séquelles de l'exposition au simulateur disparaissent généralement en une heure ou deux. La persistance de symptômes de plus de 6 heures a été observée lors de quelques études [BALTZLEY et al. 1989], mais reste, heureusement, statistiquement peu fréquente.

Un autre phénomène observé après la simulation est l'augmentation des symptômes juste après l'exposition à l'environnement provocateur, quand le sujet « retourne sur la terre ferme ». Ce phénomène est généralement appelé mal de terre ou mal du débarquement [5] [DEFLORIO et SILBERGLEIT 2006 ; D. M. JOHNSON 2007]. Par exemple, après avoir été en mer sur bateau pendant quelques heures puis être retourné à terre, il peut sembler qu'il y ait encore de la houle sous nos pieds, comme si l'on était toujours sur le bateau. Ce phénomène peut être expliqué par l'adaptation à l'environnement provocateur. Le sol ferme deviendrait ainsi cinétogène le temps que le sujet reprenne ses habitudes, cependant cela est parfois expliqué par une acclimatation aux mouvements subitement arrêtés.

5. À ne pas confondre avec le syndrome du mal de débarquement (MdDS) qui est beaucoup plus critique et durable. C'est une pathologie caractérisée par la persistance d'une sensation de mouvement, qui peut durer jusqu'à un mois, souvent suite à un déplacement en moyen de transport. Maladie rare, qui touche plus fréquemment les femmes.

À cause des risques que peuvent représenter ces différents effets postérieurs, des restrictions d'activités sont généralement imposées aux sujets après une simulation. Dans l'armée, la période minimale recommandée avant de pouvoir piloter de nouveau un avion varie de 6 à 12 heures et comprend généralement l'exhortation à attendre jusqu'au lendemain [D. M. Johnson 2007]. Dans le cas de la simulation de conduite, on conseille 1 à 3h avant de reprendre le volant suivant les symptômes, et un minimum de 6h entre chaque simulation si on désire éviter un phénomène d'accumulation des symptômes.

3.3.2 Étiologie

En plus d'être polysymptomatiques, les cinétoses sont connues pour être polygéniques [R. S. Kennedy et Fowlkes 1992]. C'est-à-dire que de nombreux facteurs peuvent affecter le déclenchement ainsi que la sévérité des symptômes associés. Ces facteurs peuvent être divisés en trois catégories suivant leurs origines [Kolasinski 1995] : liés au simulateur, à la tâche ou à l'individu (cf. table 3.1.) Chaque facteur pouvant avoir une influence spécifique sur les symptômes de cinétoses, il est utile d'identifier leurs liens afin d'apporter de potentielles corrections. Une liste non exhaustive de facteurs sera ici présentée afin d'en discuter certains présentant un intérêt dans la compréhension du phénomène ainsi que pour notre étude (pour plus détails e.g. Kolasinski [1995] et S. Nichols et Patel [2002]).

Individuel	**Simulateur**	**Tâche**
Âge	Calibration	Degré de contrôle
Sexe	Couleurs et contraste	Durée
Ethnicité	Résolution	Flux visuel
Expérience de la tâche réelle	Stéréoscopie	Mouvements de tête
Expérience avec le simulateur	Champ de vision	Altitude du terrain
Seuil de perception du scintillement	Scintillement	Luminance
Niveau de concentration	Distance inter-pupillaire	Manœuvres inusuelles
Maladie et sensibilité	Plateforme de mouvement	Déplacements
Capacité de rotation mentale	Retards et décalages	Taux d'accélérations
Style de perception	Erreur de localisation	Vitesse du déplacement
Instabilité posturale	Distorsion de l'image	Vection
Capacité d'adaptation	Fréquence d'image	Assis ou debout

Table 3.1 – Facteurs pouvant influer le mal du simulateur [Kolasinski 1995]

Facteurs liés au simulateur

Seront ici abordés certains des facteurs influant sur le mal du simulateur, dus à la conception et aux technologies utilisées dans les simulateurs de conduite. Certains facteurs ont déjà été sommairement abordés dans le chapitre 2. Ces facteurs sont, en majeure partie, des défauts de disparité avec la réalité qui déclenchent le mal du simulateur. Si un simulateur pouvait reproduire fidèlement la réalité, il n'y aurait pas de mal du simulateur, même si le mal des transports peut quand même être présent comme dans une voiture. De plus, ce qui semble au premier abord être une amélioration vers la fidélité mène parfois à plus de cinétoses. Le meilleur exemple est l'augmentation du champ de vision que nous verrons ci-dessous.

Le premier choix dans un simulateur de conduite réside dans les types de technologies utilisées pour les restitutions : base fixe ou mobile ; écrans, projecteurs ou casque de visualisation. Ce choix influe sur le mal du simulateur même s'il est complexe d'évaluer lesquels d'entre eux minimiseront les symptômes en fonctions des tâches à réaliser. De plus, ce critère n'est pas le seul pris en compte lors de la décision, ni même pas un critère important ou parfois pris en compte. Cependant, si le mal du simulateur est susceptible d'être une préoccupation, alors il peut être nécessaire de faire preuve de prudence lors de l'ajout de mouvement ou de l'utilisation d'un casque immersif.

- Plateforme mobile : Le mouvement a été ajouté assez tôt aux simulateurs de conduite dans le but de réduire les possibles conflits sensoriels visuo-vestibulaires, et ainsi de réduire le risque de mal du simulateur. En règle générale, l'ajout de mouvement semble réduire le mal du simulateur ou le laisser inchangé, ce n'est cependant pas toujours le cas. Aujourd'hui, différents systèmes de mouvement ont été ajoutés à de nombreux simulateurs de conduite, souvent dans le but d'accroitre le réalisme et la validité des réponses des sujets (cf. 2.2.5).

Parmi les différentes technologies présentées précédemment, il est difficile de déterminer quel type de mouvement est le meilleur en termes de réduction du mal du simulateur. Cependant, plus les mouvements seront réalistes, comme avec une plateforme 6 axes sur rails, moins le mal du simulateur sera sévère. Toutefois, il est actuellement impossible de reproduire les grandes accélérations ressenties en voiture. D'autres stratégies doivent être utilisées, spécialement dans les algorithmes de contrôle des mouvements du simulateur afin de minimiser les conflits sensoriels [Rengifo 2020]. Une stratégie de mise à l'échelle des forces et mouvements est souvent utilisée, l'être humain normal faisant peu de différence entre les forces alors perçues. Elle permet une réponse proportionnelle, maximisant les quantités de mouvement, en restant dans les limites du matériel.

- Restitution visuelle : Étant donné le grand nombre de paramètres visuels lié à l'apparition du mal du simulateur, il semble évident que le type de dispositif de restitution visuel choisi influe directement sur ce phénomène. Les différents dispositifs de restitution visuel ont été cités précédemment avec leurs avantages (cf. 2.2.4). Cependant, ce choix, tout comme le précédent, est davantage influencé par les tâches à réaliser dans le

simulateur.

Dans le cas de scénarios simples, ne nécessitant pas particulièrement de génération d'images asservies au mouvement de tête, l'utilisation d'un HMD (head mounted display) parait être un choix assez risqué [S. Nichols, Ramsey et al. 2000]. En effet, en plus des facteurs abordés par la suite concernant les dispositifs plus standards, les casques ajoutent d'autres facteurs sources de mal du simulateur [Mourant et Thattacherry 2000]. Les casques sont connus pour générer plus de problèmes d'accommodation et de vergences dus aux distances interoculaires peu précises et à une accommodation forcée entre 1 à 1,5 m. De plus, les systèmes de suivis des mouvements de tête induisent une petite erreur ainsi qu'une latence qui sont plus perceptibles dans ce cas et peuvent générer des cinétoses [Perroud et al. 2018]. De plus, la proximité aux écrans rend les taux de rafraichissement plus perceptibles et pouvant créer des phénomènes de scintillement de l'écran, source de cinétoses [Pausch et al. 1992]. Le poids du casque peut aussi affecter l'interprétation par le corps de la masse de la tête et donc des mouvements captés par les otolithes [Dizio et J. R. Lackner 1992]. Cela engendre, à son tour, un conflit entre les systèmes proprioceptif et vestibulaire. Il a été constaté que le poids de l'équipement suffisait à lui seul à déclencher les symptômes de cybersickness sans tenir compte de stimulus visuels [Dizio et J. R. Lackner 1992].

- Champ de vision : L'augmentation du champ de vision est un facteur qui a depuis longtemps été identifié comme générant davantage de mal du simulateur [Casali et Frank 1986 ; R. S. Kennedy, Lilienthal et al. 1989 ; Dizio et J. R. Lackner 1992]. Les explications peuvent être diverses. Premièrement, cela serait dû à l'importante stimulation de la rétine périphérique, augmentant le flux optique, accentuant donc les sensations de vection ainsi que la perception du scintillement de l'écran [Boff et Lincoln 1988], connues pour être respectivement des conditions nécessaires [R. Kennedy et al. 1988 ; Hettinger et Riccio 1992] et aggravantes du mal du simulateur. Bien que les effets de vection et de mal du simulateur aient été signalés dans des champs de vision aussi étroits que 15 degrés [Andersen et Braunstein 1985], un champ de vision plus grand a tendance à être un facteur d'augmentation de cinétoses [IJsselsteijn et al. 2001]. Deuxièmement, de grands champs visuels augmenteraient les conflits sensoriels avec des indices vestibulaires décorrélés ou absents [Casali et Frank 1986 ; M. McCauley et Sharkey 1992 ; Pausch et al. 1992] qui, selon la théorie de J. Reason et Brand [1975], seraient source de cinétoses.

Ce facteur confronte les acquéreurs d'un simulateur à un compromis où le système visuel devrait avoir un champ de vision juste assez grand pour permettre aux sujets de réaliser leurs tâches, mais aussi pour leur immersion dans les scénarios. Celui-ci ne doit toutefois pas être trop grand afin de limiter le flux optique et le mal du simulateur [Stanney, Mourant et al. 1998]. Le champ de vision requis pour la conduite de véhicules terrestres varie en fonction des tâches expérimentales effectuées. En situation de conduite sur autoroute, le conducteur doit être capable d'observer l'environnement devant lui afin de déterminer la chaussée, les autres utilisateurs, ainsi que la perception de vitesse. Aux intersections, le conducteur a besoin de moins d'informations sur sa vitesse, mais nécessite un plus grand champ de vision afin de vérifier la circulation sur toutes les

voies.

- Propriétés de l'image : La luminance, le contraste et la résolution sont les propriétés principales de l'image. Dans le cas de la simulation, la fréquence et la latence d'affichage peuvent aussi être ajoutées.

La résolution d'image peut avoir un effet sur les performances de la tâche (perception d'objets à grande distance) et contribuer également au mal du simulateur. Une résolution limitée réduit la perception de caractéristiques clés de l'environnement et cause une certaine fatigue oculaire lorsque les yeux tentent de résoudre des images floues [Govil et al. 2004]. De plus, une modification de la résolution implique des modifications de luminance et contraste afin de limiter la perception de scintillement de l'écran, facteur de cinétose [Pausch et al. 1992 ; Kolasinski 1995]. La couleur peut également avoir une influence sur la vection [Bonato, Bubka et Alfieri 2004], facteur principal des cinétoses.

La fréquence d'affichage peut avoir un impact sur le phénomène si elle n'est pas constante ou si elle est trop lente, générant des phénomènes de scintillement d'image [**rin** ; Harwood et Foley 1987 ; Pausch et al. 1992]. Cependant, les capacités informatiques et logicielles des simulateurs actuels permettent facilement un taux constant supérieur à 60 Hz, qui est préconisé, et il en est de même dans le cas d'affichages stéréoscopiques.

- Latences : La latence, ou temps de réponse, correspond au laps de temps entre la commande et ses effets restitués par le système concerné. Or, ce sont ici les latences de restitution sur les simulateurs qui nous intéressent : c'est-à-dire, les latences entre l'action du conducteur (mouvement de volant, appui sur le frein...) et ses restitutions sensorielles, avec tout particulièrement les latences visuelle et inertielle. Ces paramètres sont connus pour être sources de cinétoses, surtout dès que ce temps de réponse dépasse 30 ms [Frank et al. 1988], provoquant des conflits sensoriels supplémentaires entre les systèmes visuel et vestibulaire [K. E. Money 1970 ; Pausch et al. 1992 ; Kolasinski 1995 ; M. H. Draper 1996 ; Perroud et al. 2018].

De même, un asynchronisme entre les délais des stimulus visuels et vestibulaires est susceptible d'entrainer un conflit, alors source de malaise [Kemeny 2000 ; Pausch et al. 1992]. En effet, ce délai aurait pour conséquence d'augmenter le conflit visuo-vestibulaire, induisant le mal du simulateur [Frank et al. 1988 ; Pausch et al. 1992 ; M. H. Draper 1996]. Néanmoins, Frank et al. [1988] ont constaté que les latences visuelles étaient plus cinétogènes pour les conducteurs que les latences inertielles.

Dans le cas des visiocasques, ceux-ci sont munis de capteurs permettant un suivi de la tête afin de présenter l'orientation de vue appropriée. Les latences visuelles ont plus de risque de générer des cinétoses car elles affectent le système visuo-moteur en déclenchant une modification des réponses réflexes oculaires (RVO et ROC), ce afin de stabiliser l'image sur la rétine. La variance et l'erreur de réponse de latence peuvent donc entrainer une période d'adaptation prolongée de ces réflexes [M. H. Draper 1996]. Pour éviter ces phénomènes, il est conseillé de réduire les latences de suivi de tête sous les 50 ms [Kemeny 2000].

- Calibrations : M. McCauley et Sharkey [1992] mettent en avant les besoins de maintenance et de calibration des systèmes de simulation afin de limiter les cinétoses. Ils soulignent, notamment, l'importance d'un certain nombre de calibrations au niveau de la restitution visuelle, pouvant augmenter les distorsions spatiales ou temporelles et causer des cinétoses visuellement induites.

Par exemple, la position de l'observateur peut avoir une influence. Celui-ci doit être placé de telle sorte que son point de vue corresponde à celui prévu dans la conception du simulateur. En effet, un léger changement de l'emplacement du conducteur dans le véhicule aura un effet significatif sur le flux optique et les informations visuelles, et ce même avec des mouvements de tête dans le cas où les écrans sont assez proches [R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987]. Ainsi, un passager assis dans le simulateur ne recevra pas les mêmes signaux que le conducteur, celui-ci étant construit pour le point de vue du conducteur, et sera donc plus sensible au mal du simulateur [Riccio et Stoffregen 1991 ; Casali et Wierwille 1986].

De nombreux simulateurs utilisent plusieurs écrans ou vidéoprojecteurs, bien qu'un désalignement puisse entrainer le mal du simulateur [Hettinger, Nolan et al. 1987 ; R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987]. De même, une mauvaise mise à l'échelle de l'image entraine une adaptation des réflexes oculaires engendrant le mal de simulateur [M. H. Draper et al. 2001].

Facteurs liés à la tâche

Les actions du conducteur, ainsi que les stimulations inhérentes à sa tâche simulée, vont naturellement impacter sa susceptibilité au mal du simulateur. La conception des scènes et des scénarios offre aux opérateurs ayant déjà le simulateur de conduite une dernière possibilité de limiter la sévérité des symptômes.

- Conception du scénario : Un des facteurs les plus importants et les moins controversés est la durée, dans la mesure où plus le temps de simulation est long, plus la probabilité d'éprouver des symptômes, ainsi que leur sévérité. Ce facteur évident a été démontré plusieurs fois [M. McCauley et Sharkey 1992 ; Kolasinski 1995 ; Cobb 1999 ; M. H. Draper et al. 2001 ; Lo et So 2001] et est concordant à toutes les théories. Il a été montré qu'au moins un quart des incidences du mal du simulateur pouvaient être attribuées à la durée de la simulation, et que ce facteur est en majeure partie indépendant des autres [R. S. Kennedy, Dunlap et al. 1990].

À l'instar de la conduite non simulée, il a été prouvé que les sujets en conduite active (conducteur) sont moins touchés que les sujets en conduite passive (passager) [Riccio et Stoffregen 1991 ; Rolnick et Lubow 1991 ; Pausch et al. 1992 ; Kolasinski 1995]. Casali et Wierwille [1986] approfondissent cette observation en montrant un lien entre le degré de contrôle des participants et leur susceptibilité au mal du simulateur. Ce phénomène s'explique par le fait que lorsque les conducteurs exercent un certain contrôle sur le mouvement réel et/ou visuel, ils sont plus à même de les anticiper, contrairement

aux sujets passifs qui subissent les mouvements [Pausch et al. 1992]. Cet effet peut être expliqué par les théories du réarrangement sensoriel et du cadre de référence, car les conflits sont minimisés par l'anticipation. De plus, cette anticipation joue aussi sur le contrôle postural afin de limiter les effets des mouvements à venir [Dong et al. 2011], comme des contractions musculaires et orientations préférentielles.

- Mouvements, accélérations et vibrations : Les mouvements sont un autre facteur important à prendre en compte lors de la conception d'un scénario. En général, il est recommandé de minimiser les changements rapides de direction et les accélérations (et décélérations) brusques. Par conséquent, les courbes avec de plus grands rayons sont moins cinétogènes que les courbes plus serrées, comme avec les routes de montagne [Kemeny, Colombet et al. 2015]. Dans le même ordre d'idée, les virages à 90 degrés sont connus pour augmenter la probabilité de mal du simulateur [Edwards et al. 2003 ; Mourant, Rengarajan et al. 2007 ; Park et al. 2006].

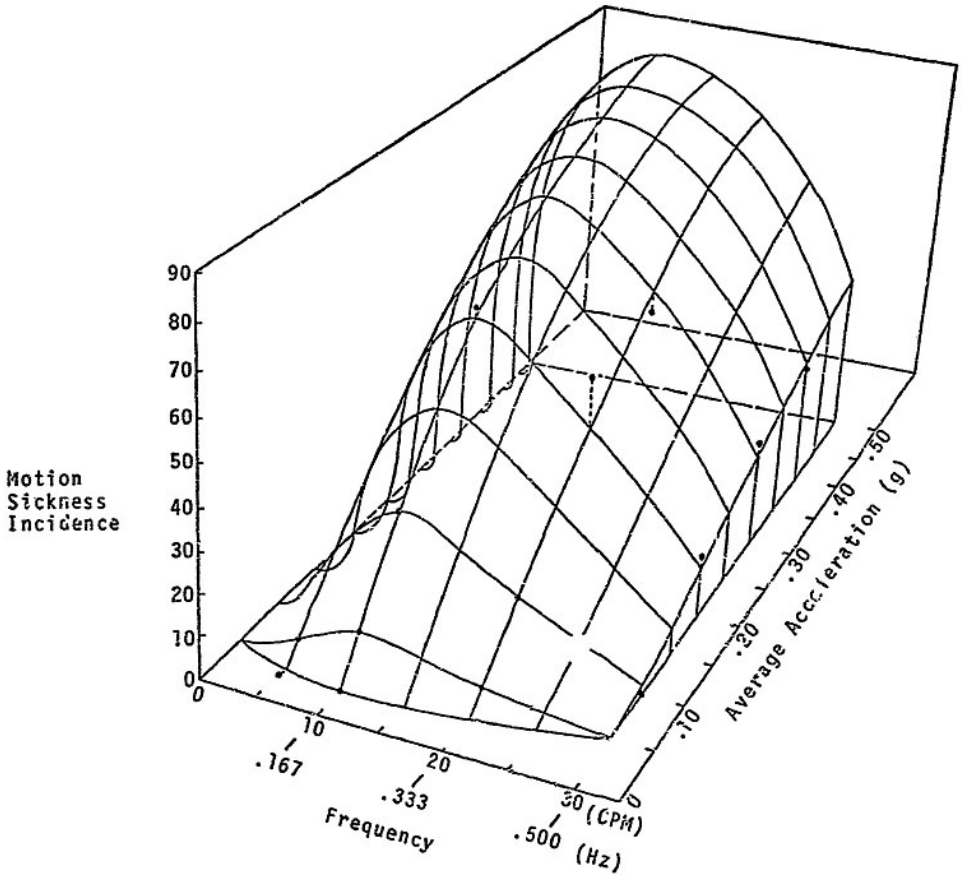


Figure 3.6 – Influence de la fréquence sur l'incidence des cinétoses [O'Hanlon et M. E. McCauley 1974]

En plus des accélérations, les cinétoses peuvent être déclenchées par des mouvements de très faibles fréquences. En effet, les oscillations inférieures à 1 Hz sont une variable majeure contribuant à l'installation des cinétoses [R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987 ; R. S. Kennedy et Fowlkes 1992 ; Griffin 1990]. Ces mouvements oscillatoires ont une symptomatologie maximale se produisant à des fréquences d'environ 0,2 Hz

(cf figure 3.6) [O'Hanlon et M. E. McCauley 1974]. De tels mouvements de basses fréquences sont présents dans la plupart des transports (voitures, navires, bus, avions, etc.), constituant un facteur aggravant dans ces situations [J. F. Golding 2006a].

- Vection : La vection visuelle, comme vue précédemment (cf. 2.1.2), est connue pour être une condition suffisante au déclenchement du mal du simulateur [Hettinger et Riccio 1992 ; Hu, Davis et al. 1997 ; Dizio et J. R. Lackner 1992]. C'est pourquoi il est conseillé de réduire les indices visuels de la scène pouvant augmenter la perception du flux optique et la vection afin de réduire le mal du simulateur. Parmi ces indices, on retrouve surtout l'ensemble des objets en bords de routes : panneaux, arbres, barrières, bâtiments, etc. Dans une moindre mesure, il est aussi possible d'éloigner les arbres et d'utiliser des textures lisses et uniformes. Cependant, ces indices sont également importants pour le réalisme, l'immersion et la perception de vitesse. Ces éléments sont donc à contrebalancer en fonction des besoins de la simulation.

- Environnement : La température ambiante a, depuis longtemps, été identifiée comme facteur amplificateur du mal du simulateur [R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987]. Cependant, la relation entre la température et les cinétoses n'a pas encore été prouvée, mais il est probable qu'elle augmente l'ampleur et le taux de conscience des symptômes. De plus, combinée avec l'augmentation de la fréquence cardiaque, de la pression artérielle, des respirations, et de la température de la peau, elle augmente l'inconfort du sujet [Jang et al. 2002], comme l'exprime le besoin d'air frais évoqué par certains. Par mesure de précaution, il est recommandé d'intégrer une ventilation et un contrôle de la température adéquats [D'Amour et al. 2017].

En plus de la température, les odeurs peuvent avoir une influence sur les cinétoses. Il est avéré qu'une odeur de cuir ou de voiture neuve peuvent être désagréables, voire nauséogènes, pour certains individus. Cette hypothèse a pu être validée par Keshavarz, Stelzmann et al. [2015], montrant même une réduction de symptômes avec une odeur plaisante. De même, l'odeur de nourriture est supposée engendrer des perturbations gastriques aux heures de repas.

Facteurs liés à l'individu

Comme on peut l'observer assez facilement avec les transports, les individus disposent de susceptibilités différentes face aux cinétoses. Bien que la complexité de notre organisme ainsi que sa grande diversité rendent difficile l'étude de ces facteurs, certains travaux ont pu identifier quelques grands facteurs développés ci-dessous (pour plus de détails e.g. Kolasinski [1995] et S. Nichols et Patel [2002])

- Âge : L'âge est souvent rapporté comme facteur de susceptibilité aux cinétoses, il n'y a cependant pas de consensus clair sur la variation de sensibilité en fonction de celui-ci

[D. M. Johnson 2005]. Il est souvent rapporté que, comme pour le mal des transports, les enfants de moins de 2 ans sont très peu sensibles, et que la susceptibilité augmenterait jusqu'aux environs de 20 ans, puis déclinerait légèrement, rendant les personnes âgées peu sensibles [J. Reason et Brand 1975 ; J. F. Golding 2006a ; Pausch et al. 1992 ; Kolasinski 1995]. Certaines études voient la sensibilité augmenter avec l'âge, il faut toutefois prendre en compte l'habitude, abordée ci-dessous, qu'ont les nouvelles générations par rapport aux écrans et donc aux cinétoses visuellement induites [Rizzo et al. 2003].

- Sexe : L'âge et le sexe sont les deux principaux facteurs de différences de susceptibilités inter-individuelle pour les cinétoses. À l'instar du mal des transports [Lawther et Griffin 1987 ; Turner et al. 2000], le mal des simulateurs enregistre une susceptibilité accrue pour les femmes soulevant même une incidence plus élevée des symptômes nauséeux[Biocca 1992 ; Pausch et al. 1992 ; Kolasinski 1995 ; Munafo, Diedrick et al. 2017].

Les raisons précises de ces différences sont encore assez méconnues, cependant quelques hypothèses ont été avancées quant à leur explication. Premièrement, la susceptibilité élevée des femmes aux cinétoses, ainsi qu'aux nausées et aux vomissements post-opératoires ou induits par la chimiothérapie, peut être due à une fonction évolutive de protection. De cette manière, des seuils de sensibilités plus faibles chez les femmes peuvent servir à prévenir l'exposition du fœtus aux toxines nocives pendant la grossesse [J. F. Golding 2006a]. Deuxièmement, la différence de susceptibilité serait due aux différences dans le contrôle de la posture entre les sexes [Koslucher, Haaland, Malsch et al. 2015 ; Koslucher, Haaland et Stoffregen 2016 ; Munafo, Diedrick et al. 2017]. Suivant la théorie écologique d'instabilité posturale [Stoffregen et Riccio 1991], la différence de contrôle postural peut, en effet, jouer un rôle quant à la susceptibilité aux cinétoses [Stoffregen, F.-C. Chen et al. 2013]. Ces différences sexuelles dans le balancement postural sont liées au dimorphisme sexuel, c'est-à-dire aux différences physiques et biomécaniques du corps [Chiari et al. 2002 ; Munafo, Diedrick et al. 2017].

Une autre hypothèse part du fait que les femmes ont un champ visuel un peu plus large que les hommes, pouvant avoir une incidence sur le mal du simulateur via une augmentation du papillonnement de l'image et des phénomènes de vection [LaViola Jr 2000]. Finalement, comme beaucoup de ces données sont issues de questionnaires d'auto-évaluations, ce phénomène serait peut-être d'origine psychologique. C'est-à-dire que les hommes pourraient être plus enclins à sous-déclarer la gravité de leur inconfort [Biocca 1992 ; Kolasinski 1995].

- Expériences et habitudes : Se baser sur la susceptibilité antérieure des personnes aux cinétoses est un bon indicateur de la susceptibilité du sujet au mal du simulateur. Plusieurs études valident ce constat en utilisant des questionnaires de mesure de l'historique des cinétoses [D. M. Johnson 2005]. Toutefois, ces questionnaires ne permettent qu'un aperçu subjectif de la susceptibilité, mais ne permettent pas de prédiction juste, la nature des situations cinétogènes étant très largement variable.

Suivant la théorie des conflits sensoriels, les cinétoses sont déclenchées lorsqu'il y a

une différence entre le modèle actuel d'informations sensorielles et celui qui est attendu sur la base de l'expérience passée. Ainsi, cette théorie annonce que plus un sujet a acquis d'expérience relative à l'environnement réel simulé, plus grande sera la disparité entre sa mémoire neuronale et le modèle présenté par le simulateur, et plus il sera sujet aux cinétoses. Cette explication est validée par les différentes données montrant des différences significatives entre des sujets très expérimentés et des sujets novices [Crowley 1987 ; J. Miller et J. Goodson 1960].

Cette théorie énonce également une possibilité d'apprentissage ou habituation aux situations cinétogènes. En dehors de la théorie, c'est un effet qui a pu être observé à de nombreuses reprises [Benson 2002 ; Griffin 1990 ; M. McCauley et Sharkey 1992]. Les individus confrontés à une situation cinétogène s'habituent en effet à ce nouveau modèle de simulation sensorielle, comme par exemple avec le pied marin. En effet, comme nous allons le voir par la suite, l'adaptation est parmi l'une des solutions les plus fortes et les plus puissantes pour éviter le mal du simulateur [R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987].

- Perception individuelle : Chaque individu a sa propre façon de percevoir le monde acquise au cours de ses différentes expériences. Les cinétoses étant basées sur la perception de la vitesse et du mouvement, cela peut avoir son influence. Premièrement, la typologie spatiale, ou style perceptif, d'un individu est déterminée par rapport à sa relation de dépendance ou d'indépendance à l'égard du champ visuel. Par conséquent, les individus indépendants vont être plus sensibles aux indices corporels que visuels. Cependant, cette sensibilité particulière semble à l'origine de leur susceptibilité accrue aux cinétoses visuellement induites, par rapport aux sujet dépendants à l'égard du champ [Barrett et Thornton 1968]. À l'inverse, les sujets au style de perception dépendant sont plus sensibles aux situations de mouvement cinétogène [Barrett, Thornton et Cabe 1970]. C'est pourquoi les sujets au style de perception dépendant sont en général plus susceptibles au mal du simulateur, étant plus sensibles aux informations visuelles périphériques que fovéales [Ebenholtz 1977].

Deuxièmement, la capacité de rotations mentales est un autre paramètre cognitif pouvant affecter la susceptibilité aux cinétoses [Kolasinski 1995 ; D. E. Parker et Harm 1992]. Cette capacité représente l'aisance qu'a une personne à faire tourner un objet mentalement en extrapolant sa forme ainsi qu'à comprendre un objet à partir de ses projections (par exemple, la compréhension d'un objet 3D à partir d'un plan technique). C'est pourquoi l'hypothèse a été émise que les personnes douées pour les rotations mentales soient plus à même de s'adapter aux environnements cinétogènes, réduisant de plus la charge mentale [D. E. Parker et Harm 1992].

3.3.3 Évaluations, mesures et prédictions des symptômes

Il existe un certain nombre de mesures différentes du mal du simulateur qui peuvent être utilisées. Le mal du simulateur étant polysymptomatique, il offre tout un panel de possibilités de mesures. Cependant, la mesure d'un seul symptôme peut être une mesure non représentative et non significative [R. S. Kennedy et Fowlkes 1992]. De plus, les facteurs des cinétoses étant assez bien identifiés dans la littérature, cela peut permettre une première évaluation, avant exposition du mal du simulateur, en fonction de l'individu ou du scénario.

Prédictions de l'incidence des cinétoses

En se basant sur son historique de susceptibilité aux différentes cinétoses, il est possible d'évaluer la sensibilité d'un sujet face à celles-ci. Birren et M. B. Fisher [1947] ont été les premiers à proposer un questionnaire pour prédire la sensibilité au mal de mer. Un certain nombre de questionnaires sont rapportés dans la littérature, dont les plus utilisés ont d'abord été le Pensacola Motion History Questionnaire (PMHQ) [R. S. Kennedy, Dunlap et al. 1990] et le Reason and Brand Motion Sickness Susceptibility Questionnaire (MSSQ) [J. T. Reason 1968 ; J. Reason et Brand 1975]. Ces questionnaires ont ensuite été repensés et simplifiés par Golding avec le MSSQShort [J. F. Golding 2006b ; J. F. Golding 1998] pour augmenter leur fiabilité et validité, en y ajoutant des facteurs individuels tels que l'âge, le sexe, l'ethnie, etc. En raison de leur moindre cout, les questionnaires de susceptibilité au mal des transports sont des instruments utiles dans la prédiction de la sensibilité au mal des transports, mais n'annoncent en aucun cas si le sujet va être malade ou non et à quel degré.

Les questionnaires étant assez subjectifs, surtout par rapport aux expériences précédentes pouvant être minimisées, d'autres modèles de prédiction ont alors essayé de se baser sur des mesures physiologiques. C'est le cas, par exemple, de l'évaluation des fonctions vestibulaires [Shupak et al. 1990] ou encore avec les données posturographiques suivant la théorie d'instabilité posturale [Shahal et al. 1999]. Comme précédemment, ces modèles ne fournissent cependant qu'une tendance et non de réelles prédictions.

D'autres études se sont, quant à elles, appliquées à évaluer les taux de provocations que peuvent générer les situations cinétogènes. En évaluant, par exemple, la « dose de mouvements » grâce à des modèles mathématiques, il s'agit de se baser sur les paramètres de mouvement (amplitude de l'accélération, fréquence et durée) pour prédire l'incidence du mal de mer [Lawther et Griffin 1987]. Ces modèles peuvent seulement servir à prévoir quels scénarios seront plus cinétogènes que d'autres.

Questionnaire sur les cybermalaises*
Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO
(Traduit de Kennedy, R.S.et al., 1993)

Numéro_____ Date_____

Consignes : Encerclez à quel point chaque symptôme ci-dessous vous affecte présentement.

1. Inconfort général	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
2. Fatigue	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
3. Mal de tête	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
4. Fatigue des yeux	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
5. Difficulté à faire le focus	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
6. Augmentation de la salivation	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
7. Transpiration	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
8. Nausées	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
9. Difficulté à se concentrer	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
10. Impression de lourdeur dans la tête	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
11. Vision embrouillée	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
12. Étourdissement les yeux ouverts	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
13. Étourdissement les yeux fermés	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
14. *Vertiges	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
15. **Conscience de l'estomac	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
16. Rots	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement

* Les vertiges sont vécus comme une perte de l'orientation par rapport à la position verticale.
** L'expression « conscience de l'estomac » est habituellement utilisée pour désigner un sentiment d'inconfort sans nausée.

FIGURE 3.7 – Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) version franco-canadienne du laboratoire de cyberpsychologie de l'UQO [BOUCHARD et al. 2007]

Questionnaires d'auto-évaluations

Les mesures les plus utilisées afin d'évaluer les cinétoses sont les questionnaires d'auto-évaluations. Ceux-ci ont l'avantage de prendre en compte le caractère polysymptomatique du syndrome, tout en étant facile d'utilisation. Ces évaluations subjectives peuvent aussi prendre la forme de rapports verbaux, ayant pour atout de pouvoir suivre l'évolution du mal du simulateur au cours de l'exposition, contrairement aux questionnaires qui sont remplis après l'exposition, mais étant en général plus complets dans leur analyses.

Les rapports verbaux peuvent prendre plusieurs formes, mais consistent généralement à évaluer l'inconfort global sur une échelle de 0 à 3, (0 : aucun effet, 3 : fortes nausées) [J. GOLDING et MARKEY 1996]. Cependant, un inconvénient majeur de ces mesures est

le potentiel effet d'amorçage. C'est-à-dire que le fait de demander au sujet s'il est malade peut augmenter les symptômes par somatisation car l'individu se focalisera dessus tout en s'attendant à être malade [Kirkner 1949].

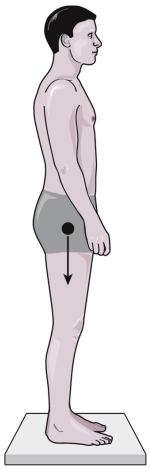
Le questionnaire le plus connu pour le mal du simulateur est le « Simulator Sickness Questionnaire » (SSQ), développé par Lane et R. S. Kennedy [1988] [R. S. Kennedy, Lane et al. 1993], ainsi que sa traduction française du laboratoire de cyberpsychologie de l'UQO (cf. figure 3.7)[Bouchard et al. 2007]. Le SSQ consiste à évaluer la gravité de 16 symptômes identifiés du mal du simulateur sur une échelle de sévérité de 4 points (Pas du tout - Un peu - Modérément - Sévèrement). Ces symptômes sont regroupés en trois sous-échelles partiellement indépendantes, comme les nausées, l'inconfort oculomoteur et la désorientation. La comparaison de ces sous-échelles fournit un potentiel diagnostic des aspects de la simulation qui provoquent les symptômes. En outre, il existe un score de sévérité total qui combine les résultats de ces sous-échelles en une évaluation du niveau global de malaise. Les sujets remplissent ce questionnaire avant et après chaque exposition afin d'observer l'évolution de leurs symptômes (certains pouvant être présents sans mal du simulateur). Le SSQ est le questionnaire le plus largement utilisé pour les études sur simulateur, ainsi que validé par la communauté scientifique [Balk et al. 2013 ; D. L. Fisher et al. 2011].

Mesures physiologiques

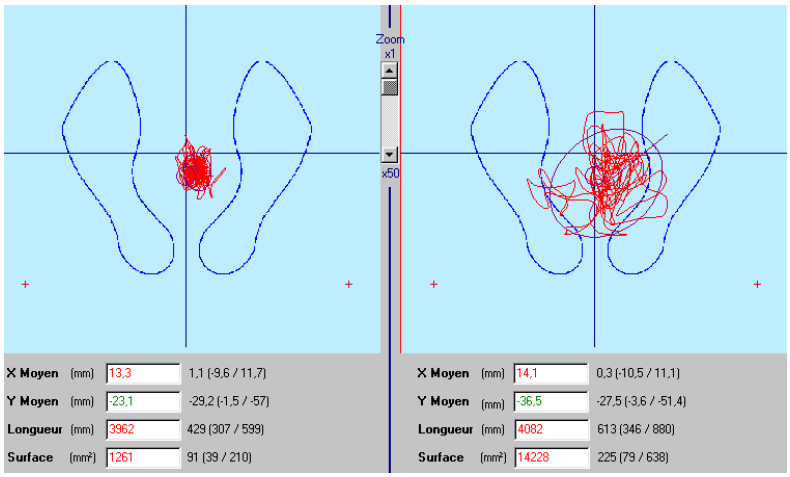
Les questionnaires d'auto-évaluations étant subjectifs, il est intéressant d'obtenir des mesures plus objectives. Néanmoins, la plupart des symptômes étant internes, ils sont difficilement mesurables et non nécessairement représentatifs du caractère polysymptomatique du syndrome. Diverses tentatives ont été effectuées afin de corréler les cinétoses avec des mesures physiologiques, cependant peu d'entre elles montrent des relations claires avec les cinétoses ou ne sont pas assez significatives pour être utilisées lors d'expérimentations. Parmi celles-ci se retrouvent les mesures de la fréquence cardiaque, de la pression artérielle, de la motilité gastrique avec électrogastrogramme (EGG) et de la sudation de la peau grâce à la conductance cutanée [Casali et Wierwille 1986 ; Dizio et J. R. Lackner 1992 ; Harm 1990 ; Plouzeau et al. 2018 ; Bertin et al. 2004]. Ces mesures, pas toujours simples à mettre en place, présentent l'intérêt de suivre l'évolution des cinétoses au cours de l'exposition en prenant soin de différencier les altérations de cette mesure dues à d'autres paramètres, tels que le stress.

La mesure physiologique la plus utilisée et significative est sans doute la mesure d'instabilité posturale [Cobb 1999 ; R. S. Kennedy, Berbaum et Lilienthal 1997 ; Kemeny, George et al. 2017 ; Munafo, Curry et al. 2016 ; Stoffregen, Hettinger et al. 2000]. En effet, suivant la théorie écologique [Riccio et Stoffregen 1991], l'instabilité posturale serait à l'origine des cinétoses, et la quantification de cette perturbation posturale serait donc une mesure fiable quant à l'état de malaise du sujet [Stoffregen et Smart 1998 ; Stoffregen, Hettinger et al. 2000 ; Smart et al. 2002 ; R. S. Kennedy et Fowlkes 1992]. Initialement, ces tests incluaient différentes postures, telles que se tenir debout sur sa jambe de prédilection, se tenir debout sur l'autre jambe et marcher

sur une ligne, avec les yeux ouverts ou fermés, etc[M. Draper 1998]. Actuellement, les balances stabilométriques (mesures d'équilibre postural) sont plus sensibles car elles mesurent et suivent avec précision les déplacements subtils du centre de gravité du corps sur une période donnée (cf. figures 3.8). Afin de quantifier les cinétoses, l'évolution de différents indicateurs posturaux peut être observée, comme la grandeur spatiale qui, suivant la norme AFP 85, se mesure par la surface de l'ellipse de confiance contenant 90 % des positions de la projection du centre de gravité (cf. figure 3.8b), ou encore la multifractalité du balancement postural [Munafo, Curry et al. 2016].



(a) Mesure sur balance stabilométrique



(b) Instabilité posturale avant et après exposition cinétogène

Figure 3.8 – Exemple de mesure stabilométrique d'instabilité posturale [TechnoConcept 2007]

3.3.4 Cinétoses et véhicule autonome

Le véhicule autonome, par son principe de conception, permet aux conducteurs de s'engager dans des tâches non liées à la conduite. Avec le contrôle du véhicule entre les mains du système, le conducteur devient désormais passager et peut s'adonner à diverses activités : se détendre, prendre un café, consulter ses e-mails, lire le journal, voire même faire pivoter son fauteuil et avoir une conversation face à face avec d'autres passagers. Les designs intérieurs de ces futurs véhicules seront conçus pour devenir davantage des espaces sociaux, de travail et de divertissement.

Cependant, les cas d'utilisations envisagés pour la conduite autonome sont également ceux pouvant conduire à une augmentation des cinétoses. Premièrement, l'automatisation modifie la fonction de conducteur actif à un rôle de passager passif. Deuxièmement, on présume que les occupants effectueront des tâches non liées à la conduite, les faisant détourner les yeux de la route. Finalement, l'agencement intérieur comme des sièges inclinables ou orientables vers l'arrière, qui positionne les usagers dans des positions plus cinétogènes. Étant donné l'augmentation des conflits visuo-vestibulaire, l'incapacité

à anticiper la direction du mouvement et le manque de contrôle sur la direction du mouvement, l'environnement de véhicule autonome peut s'avérer très cinétogène.

Ces phénomènes seront tout aussi applicables dans le cadre de la simulation de conduite DIL pour le véhicule autonome. Dans la mesure où ils accentueront les symptômes de cinétose, ils seront donc à prendre en compte dans notre étude.

Changement de rôle : de conducteur à passager

Les capacités des véhicules semi-autonomes (niveau 3) et entièrement autonomes (niveaux 4 et 5) commencent à brouiller la ligne qui sépare l'expérience en véhicule de conducteurs à passagers. Le conducteur n'est plus obligé de s'engager activement dans la tâche de conduite. Même s'il peut toujours être tenu de surveiller l'état du véhicule pour permettre une commande manuelle en cas d'urgence, il devient un passager passif.

Comme évoqué précédemment, il est admis que les conducteurs actifs, qui contrôlent leurs propres mouvements, sont généralement moins sensibles aux cinétoses bien qu'ils subissent le même mouvement que leurs passagers [J. Reason et Brand 1975 ; Stanney et Hash 1998]. Ce phénomène est dû à l'incapacité des sujets à anticiper la future trajectoire du véhicule ainsi que le manque de contrôle sur la direction du mouvement, connu pour être un facteur de cinétose [J. F. Golding et Gresty 2013]. Pour les conducteurs actifs ayant une copie d'efférence des mouvements initiés, permettant donc une anticipation, les conflits ainsi générés seront moindres [Oman 1990]. Cela n'empêche cependant pas les passagers particulièrement sensibles de tomber malades.

Engagement dans des activités de distractions

Avec le contrôle du véhicule entre les mains du système, le conducteur devient désormais un passager pouvant s'adonner à d'autres activités. Celles qui sont promises à être les plus populaires sont notamment : la lecture, envoyer des SMS, regarder des films ou la télévision, jouer à des jeux, travailler, etc [Diels 2014]. Or, ces activités sont connues pour générer plus de malaises dans les transports [Cowings 1999 ; Kato et Kitazaki 2008] en faisant quitter la route des yeux, augmentant ainsi les conflits sensoriels visuo-vestibulaire. Cela s'avère particulièrement vrai pour les angles de vision vers le bas ou pour les affichages qui empêchent une vue dégagée sur la route ou l'horizon. Cependant, des écrans semi-transparents fournissent une possible solution pour minimiser l'impact de ces activités.

Design intérieur des véhicules autonomes

Le véhicule autonome a toujours été considéré comme une opportunité d'améliorer les interactions sociales lors des déplacements. Cela s'illustre notamment à travers les nom-

breux concept-cars de véhicules autonomes qui proposent des aménagements intérieurs flexibles, impliquant fréquemment des fauteuils pivotants permettant au conducteur et au passager avant de se tourner vers les passagers arrières, ou directement des intérieurs conçus comme des salons n'ayant plus besoin de conducteur (cf. 3.9). Cependant, au vu des sections précédentes (particulièrement 3.3.2), il apparait évident que faire face à l'arrière du véhicule conduit non seulement à des informations sensorielles contradictoires, mais également réduire la capacité à anticiper les trajectoires. Par conséquent, des agencements alternatifs avec des sièges dos à la route ou couchés entraineront naturellement une augmentation du mal des transports.

C'est pourquoi il est suggéré, lors de la conception des véhicules autonomes, de maximiser le champ visuel avec de grandes fenêtres, d'utiliser des écrans transparents, et d'éliminer les sièges pivotants ou orientés vers l'arrière [Sivak et Schoettle 2015]. De plus, certains constructeurs essaient de trouver des solutions, comme des affichages en réalité augmentée, des écrans ou bandeaux LED retransmettant visuellement les mouvements du véhicule, ou encore des casques de réalité virtuelle [*Symbioz*].

Figure 3.9 – Design intérieur du concept-car autonome Renault EZ-ULTIMO (`https://group.renault.com/`)

3.4 Réduire le mal du simulateur

Comme mentionné précédemment, les cinétoses ne constituent pas un sujet novateur. Étudiées depuis l'apparition des premiers moyens de transport (surtout naval), de nombreuses solutions ont vu le jour afin de minimiser ce problème de confort. De surcroit, avec l'arrivée des simulateurs de vols et de conduite, il a fallu de nouvelles solutions plus spécifiques, d'autant plus que les cinétoses influent sur les performances des pilotes. Nous allons aborder ici les différentes solutions existantes afin de lutter contre les symptômes de mal du simulateur ainsi que leurs possibles applications chez Renault.

3.4.1 Préconisations

Avant de s'orienter vers des solutions plus complexes, il s'agira ici d'aborder les différentes préconisations pouvant facilement être mises en œuvre afin de limiter le mal du simulateur. Nombre de celles-ci seront basées sur des facteurs précédemment étudiés (cf. 3.3.2).

Pour les conducteurs : Les conducteurs doivent, bien sûr, se présenter en forme lors de la simulation, c'est à dire éviter la fatigue, le manque de sommeil, ou encore la veisalgie (« gueule de bois ») [D. M. Johnson 2007 ; R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987]. De plus, il est conseillé aux conducteurs d'éviter de trop manger avant ainsi que de faire usage de substances psychoactives telles que l'alcool, des médicaments [R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987] ainsi que les drogues [L. A. Parker et al. 2011]. De même, il est conseillé de reporter la séance en cas de maladie pouvant interférer, telle que les maux d'estomacs, les rhumes, les otites, les maladies respiratoires, etc [D. M. Johnson 2007 ; R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987]. Les conducteurs doivent éviter de bouger excessivement et chercher à garder au maximum leurs têtes droites [D. M. Johnson 2005]. Si les premiers symptômes commencent à apparaitre, il est conseillé aux sujets de se détendre et de contrôler leur respiration de façon régulière, lente et profonde [Sang et al. 2003].

Sur l'environnement de simulation : Comme vu précédemment, l'environnement de simulation possède une influence sur l'incidence de cinétoses. C'est pourquoi il est conseillé qu'il ne fasse pas trop chaud, que le poste de pilotage soit aéré, ainsi que d'éviter les odeurs désagréables [Keshavarz, Stelzmann et al. 2015]. Par ailleurs, une musique peut constituer une aide en distrayant le pilote du mal du simulateur [Keshavarz et Hecht 2014]. De plus, il faut éviter de stresser les conducteurs ainsi que d'évoquer le mal du simulateur afin d'éviter un potentiel effet d'amorçage [Kirkner 1949].

Sur les scénarios : Dans la conception des scénarios, il est bien sûr conseillé d'éviter qu'ils soient trop cinétogènes. Pour cela, il faut limiter la durée des scénarios ainsi que les situations désavantageuses, telles que : les accélérations de rotation [Kemeny, Colombet et al. 2015], les mouvements verticaux [Griffin 1990], les déplacements non concordants aux visuels, les mouvements de 0,1 à 0,5 Hz, etc. Cependant, le contrôle des mouvements est assez difficile, car contrôlé par le conducteur, en revanche, il peut être utile d'agir sur les modèles de suspension [Benson 2002]. Si les pilotes doivent effectuer différents passages en simulation, il est conseillé d'espacer les sessions d'au moins 6h si le scénario est assez cinétogène [D. M. Johnson 2007 ; R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987 ; D. L. Fisher et al. 2011].

3.4.2 Médications

Une des premières utilisations de médicaments pour contrer le mal de mer remonte à 1869 avec une combinaison de chloroforme et de teinture de belladone [Zhang et al. 2016 ; Schmäl 2013]. Les médications ont, sans doute, été le moyen le plus testé et utilisé afin de lutter contre les cinétoses, surtout dans le cadre militaire. De nos jours, il existe au moins neuf types de substances actives différentes utilisées contre les cinétoses. Les prophylactiques les plus efficaces sont probablement les anticholinergiques et les antihistaminiques, en dépit de leurs effets secondaires apparents tels que la somnolence et la dépression. C'est pourquoi les combinaisons de substances sont de préférence utilisées afin d'augmenter leur efficacité et surtout d'atténuer les effets secondaires. Voir Zhang et al. [2016] pour plus de détails.

Anticholinergiques : L'atropine, la scopolamine (hyoscine) et l'hyoscyamine étaient utilisées pour traiter la sclérose en plaques avant la Première Guerre mondiale. Ces composés se sont, eux aussi, montrés plus efficaces que le placebo mais pas supérieurs aux antihistaminiques. La scopolamine est probablement le médicament simple le plus efficace. Ces substances ont des effets secondaires tels que des somnolences, la bouche sèche, la vision trouble et des étourdissements, mais en moindre mesure que les antihistaminiques.

Antihistaminiques : Dès 1949, Gray et Carliner découvre que le dimenhydrinate antihistaminique pouvait être efficace pour prévenir le mal de mer [Gay et Carliner 1949]. Parmi les antihistaminiques efficaces on retrouve le dimenhydrinate, la cinnarizine et la méclizine qui exercent une action sur le nerf vestibulaire, ainsi que la prométhazine qui a, elle, un effet de suppression global sur le système vestibulaire [Zhang et al. 2016]. Les antihistaminiques sont sans doute les substances les plus efficaces, mais avec des effets secondaires comme des vertiges, bouche sèche, la vision floue et des dépressions [Benson 2002].
La diphenhydramine peut être utilisée pour atténuer les effets indésirables des antihistaminiques.

Dopamines : Les récepteurs dopaminergiques sont connus pour jouer un rôle dans les nausées et les vomissements. Ces composés ont réussi à soulager les symptômes, cependant leur efficacité précise reste encore à valider.

Stimulants complémentaires : La d-amphétamine est plutôt utilisée dans le spatial où elle s'est montrée la plus efficace. La d-amphétamine et l'éphédrine peuvent être utilisées afin de contrer les effets secondaires sédatifs de la scopolamine et des antihistaminiques, avec cependant un risque de toxicomanie ainsi que de neutralisation l'effet de suppression vestibulaire. Cependant, la scopolamine, utilisée en association avec la d-amphétamine, altère la prise de décision et le comportement de motivation. La caféine, le psychostimulant le plus couramment utilisé, s'est montrée efficace pour contrer les troubles de la mémoire induits par la scopolamine.

Autres médications : Quelques études se penchent sur l'utilisation de cannabinoides (surtout du CBD) et son application pour les cinétoses afin de réduire les nausées et vomissements [L. A. Parker et al. 2011 ; Choukèr et al. 2010].
La poudre de racine de gingembre est sans doute la médication la plus efficace pour réduire l'incidence des nausées et des vomissements, et ce sans effets secondaires apparents [Grøntved et al. 1988 ; Mowrey et Clayson 1982].
Il peut être intéressant de citer aussi les placebos qui ont un effet notable sur les cinétoses [Graybiel et Knepton 1976].

3.4.3 L'adaptation

L'adaptation est sans aucun doute la solution la plus puissante et la plus sûre pour les cinétoses, tout en étant sans effets secondaires [R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987].

Il a été constaté qu'il existait une relation inverse entre le nombre d'heures passées en simulateur et la sévérité des symptômes de mal du simulateur. Plus il y avait eu d'expositions antérieures au simulateur, moins le mal était actuellement présent [Crowley 1987]. On peut remarquer les mêmes phénomènes avec toutes les cinétoses, comme pour les marins qui ne subissent plus le mal de mer avec l'habituation aux mouvements en mer. Cela peut s'interpréter comme une preuve d'adaptation aux stimulations cinétogènes.

Le cerveau est un organe particulièrement adaptable, notamment chez l'être humain. De nombreuses adaptations physiologiques ou perceptives ont pu être démontrées, par exemple le port de lunettes d'inversion d'image gauche / droite ou encore la perte de gravité pendant le vol spatial [Welch 1986]. Étant donné que les simulateurs peuvent également être considérés comme des environnements « anormaux » en termes de stimulation sensorielle, il est raisonnable de suggérer une adaptation à ces stimulus.

« The extraordinary adaptive capabilities of the human body are clearly

involved with both causing and overcoming motion sickness. »
— Griffin [1990]

L'adaptation aux cinétoses est cohérente et théorisée par les différentes théories. Dans la théorie des conflits sensoriels [J. Reason et Brand 1975] ainsi que dans la théorie de l'instabilité posturale [Stoffregen et Riccio 1991], les symptômes de cinétoses sont le fruit de l'adaptation à ce nouvel environnement sensoriel [Welch 1986]. En outre, J. T. Reason [1978] affirme que la caractéristique d'adaptabilité individuelle détermine en grande partie la sensibilité au mal des transports.

L'adaptation représente donc un moyen sûr d'éviter le mal du simulateur. C'est une guérison naturelle et souvent préférable à l'administration de médicaments. En revanche, l'adaptation à un monde virtuel ne se produit pas immédiatement. Elle se réalise au fil du temps, avec une exposition progressive en temps et en mouvements pouvant durer plusieurs semaines [D. M. Johnson 2007 ; R. S. Kennedy, Berbaum, Lilienthal et al. 1987]. Celle-ci doit se faire sans l'aide de médications qui viendraient perturber le processus d'apprentissage avec des perceptions modifiées annulant tout effet bénéfique de la séance [Wood et al. 1986].

L'adaptation, une fois réalisée, devra être maintenue par une exposition régulière et répétée au stimulus du mouvement [Benson 2002]. Les programmes d'accoutumance les plus complets, souvent désignés par « désensibilisation au mal de mouvement », sont utilisés lorsque les médicaments sont contre-indiqués pour les pilotes en raison des effets secondaires, comme la somnolence et la vision floue. Ces programmes ont des taux de réussite supérieurs à 85 %, mais peuvent prendre beaucoup de temps en durant de nombreuses semaines [Benson 2002].

Néanmoins, cette solution à quelques désavantages. En effet, cette adaptation est souvent spécifique à une stimulation ou un simulateur, entrainant un manque de généralisation et un problème lors du transfert d'un simulateur à un autre [J. F. Golding 2006a]. De plus, dans le cas de campagnes expérimentales sur simulateur, il est souvent nécessaire d'avoir des sujets inexpérimentés sur le simulateur afin d'avoir des résultats représentatifs de la population visée.

3.4.4 Autres solutions

D'une part, les médications impliquent des effets secondaires ainsi qu'une administration impossible sans la surveillance d'un médecin. D'autre part, l'adaptation prend du temps et empêche d'avoir des sujets naïfs. Il a donc fallu trouver d'autres solutions afin de réduire les cinétoses quand les deux solutions précédentes ne pouvaient être employées. C'est pourquoi certaines de ces solutions intéressantes vont ici être développées.

Solutions visuelles

La vue étant un des principaux sens impliqués dans l'origine du mal du simulateur, et étant plus facilement modifiable que d'autres, il est logique de trouver de nombreuses solutions visuelles.

Independent visual background (IVB) : Le fond visuel indépendant, évoqué précédemment avec la théorie du cadre stationnaire (cf. 3.2.4), peut aider à réduire les cinétoses. Celui-ci peut être mis en place grâce à des lunettes de réalité augmentée semi-transparentes laissant voir la pièce qui est fixe dans le repère utilisateur.

Lumières et lunettes stroboscopiques : Une illumination stroboscopique, avec une fréquence de flash de 4 ou 8 Hz avec un temps de pause court, semble une contre-mesure efficace lorsque le glissement rétinien est un facteur important de déclenchement du mal des transports. De plus, contrairement aux médications, les résultats suggèrent la possibilité de produire une adaptation fonctionnelle combinée aux illuminations stroboscopiques [M. Reschke et al. 2006].

Les lunettes à obturateur (utilisée par les sportifs hauts-niveaux, cf. 3.10) se sont montrées aussi efficaces qu'une lumière stroboscopique [M. F. Reschke et al. 2007].

Figure 3.10 – Exemple de lunettes à obturateur stroboscopique (`fouroux-sport-vision.com`)

Lunette Boarding-glasses : Les lunettes de Boarding Ring [*Boarding Glasses*] sont un dispositif médical breveté. Celles-ci contiennent un liquide bleu, contenu dans quatre anneaux, réagissant aux accélérations du véhicule (cf. figure 3.11). Ce liquide se déplace autour des yeux, dans le sens frontal, et dans le sens sagittal. Cette technologie repose sur la théorie des conflits sensoriels et a un fonctionnement similaire à un IVB. Le liquide permet de créer un horizon artificiel en périphérie du champ visuel sans perturber la vision centrale. Ces lunettes sont utilisables dans la plupart des modes de transports (voiture, bateau, train, avion) et, plus généralement, pour les cinétoses causées par un mouvement ressenti mais non vu (cf. 3.1.2).

Récemment, la marque s'est associée au constructeur français Citroën pour créer les lunettes « Seetroën » en montrant un effet bénéfique pour le mal des transports en véhicule autonome.

FIGURE 3.11 – Les boarding glasses [*Boarding Glasses*]

Nez virtuel : Se basant sur le même principe que l'IVB, des chercheurs ont implémenté un nez virtuel dans un visiocasque (cf. 3.12). Le nez étant un indice visuel fixe auquel on ne porte plus attention, celui-ci est peu remarqué. Il a, de plus, montré une amélioration significative, mais toutefois légère, dans le retardement des symptômes du mal de la réalité virtuelle [WHITTINGHILL et al. 2015].

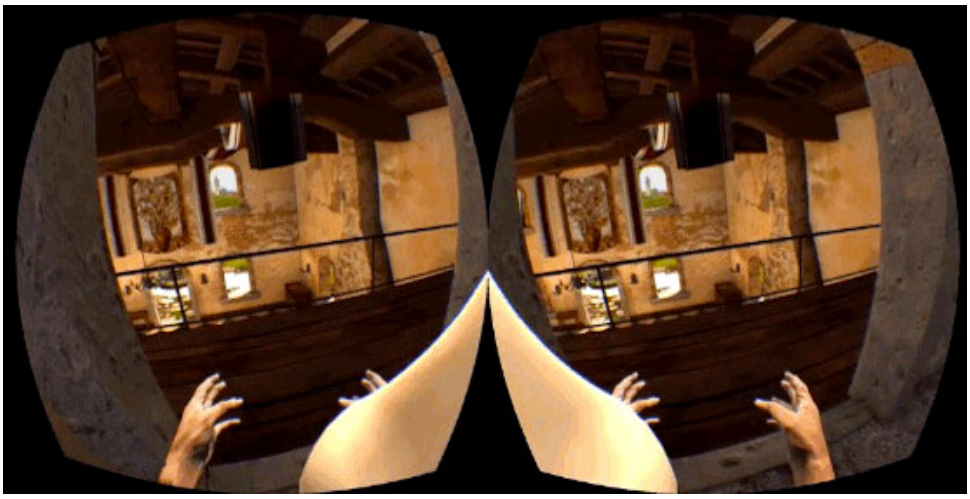


FIGURE 3.12 – Exemple de la vue du nez virtuel dans le casque [WHITTINGHILL et al. 2015]

Solutions techniques

En dehors des manipulations visuelles, il existe quelques solutions techniques de réduction de cinétoses, notamment avec les casques de réalité virtuelle pour lesquels beaucoup de techniques de déplacements ont été développées (blink, head-lock, etc .) afin d'éviter cet effet cinétogène. Cependant, ces techniques ne sont pas forcément applicables dans notre cas de simulation de conduite DIL. Nous allons aborder ici quelques solutions prometteuses ou applicables à notre contexte.

Réduction de champ de vision : Comme évoqué précédemment (cf. 3.3.2), l'augmentation du champ de vision est un facteur qui a été depuis longtemps identifié pour générer davantage de mal du simulateur [Casali et Frank 1986 ; R. S. Kennedy, Lilienthal et al. 1989 ; Kolasinski 1995 ; Dizio et J. R. Lackner 1992]. C'est pourquoi une solution simple est de limiter le champ de vision des conducteurs, réduisant cependant l'immersion, la perception des vitesses, et leur capacité de manœuvrabilité.

Restriction de mouvement : Les mouvements de tête en simulateur sont connus pour être particulièrement nauséogènes [J. Lackner 1990 ; Pausch et al. 1992], dus à des stimulations Coriolis. Les conducteurs habitués préfèrent d'ailleurs garder la tête bien droite [D. M. Johnson 2005]. Ainsi, en contraignant les mouvements des sujets et surtout de la tête, on peut réussir à réduire le mal du simulateur, bien qu'en réduisant par la même occasion leurs conforts et leurs capacités de manœuvrabilité [Webb et Griffin 2003].

Galvanic vestibular stimulation (GVS) : La stimulation vestibulaire galvanique est une technique utilisée afin de stimuler le système d'équilibre de l'oreille interne et ainsi produire et contrôler les sensations de mouvement (cf. 3.13). La GVS est utilisée depuis plus d'un siècle comme moyen de découvrir et de sonder les fonctions du système vestibulaire. Des chercheurs l'ont même utilisée pour contrôler la sensation de déséquilibre d'une personne, permettant ainsi de contrôler les déplacements du sujet via une télécommande [Maeda et al. 2005].

Son intérêt pour la réalité virtuelle et la simulation est vite apparu, dès 1998 [Campbell et Heckel 2000]. En effet, la GVS peut induire la sensation de mouvement sans plateforme de mouvement couteuse. Correctement coordonnée avec les mouvements virtuels et visuels, la GVS est capable d'éviter les phénomènes de cinétoses visuellement induites ainsi que d'améliorer l'expérience et l'immersion virtuelle [Maeda et al. 2005 ; Sra et al. 2019].

Cette solution est notamment proposée par la société vMocion™ en partenariat avec Mayo Clinic (cf. 3.14) pour créer une sensation de mouvement complète, et ce tout en atténuant les cinétoses dans divers contextes : simulateur de vols, VR, parcs d'attractions, cinéma, voire même transports et véhicules autonomes en inhibant les signaux vestibulaires [*vMocion*].

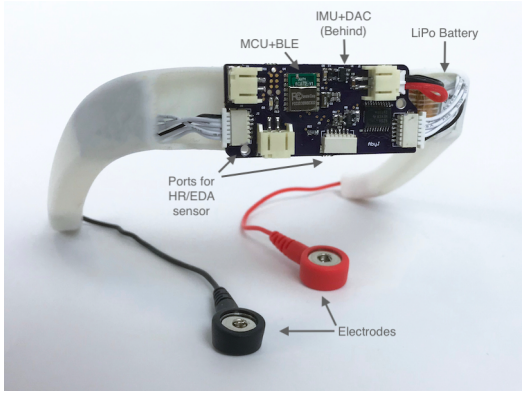


FIGURE 3.13 – Prototype de GVS pour expérimentations [SRA et al. 2019]

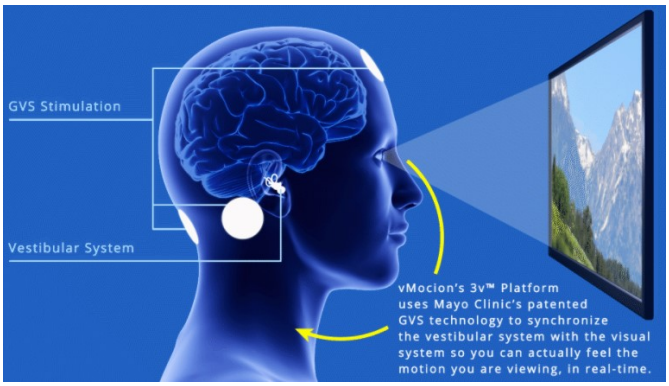


FIGURE 3.14 – Illustration du fonctionnement de la solution vMocion™ [*vMocion*]

L'acustimulation : La stimulation du point d'acupuncture P6 (ou Nei-Kuan), placé sur la face antérieure du poignet, est considérée par les acupuncteurs comme ayant un effet prophylactique en cas de mal des transports. L'acupuncture n'étant pas évidente pendant le transport ou la simulation, il existe des solutions plus simples, sous forme de bracelets. Il peut s'agir de simples bandes élastiques avec un point plastique afin d'appliquer une pression constante (acupressure) sur le point P6 (cf. figure 3.15), voire des montres délivrant de petites impulsions électriques (acustimulation) sur cette zone (cf. figure 3.16).

Les simples bracelets d'acupressure ont une efficacité assez controversée [BERTOLUCCI et DIDARIO 1995 ; HU, STRITZEL et al. 1995 ; BRUCE et al. 1990] qui est plus généralement expliquée par un fort effet placebo [K. E. MILLER et MUTH 2004]. En revanche, l'acustimulation fournie par la pression manuelle cyclique ou la stimulation électrique a un effet bénéfique statistiquement significatif [HU, STRITZEL et al. 1995 ; BERTOLUCCI et DIDARIO 1995]. L'acustimulation peut être utilisée comme méthode à court terme et sans effets secondaires, surtout dans des cas de faibles cinétoses.

3.4.5 Application chez Renault

Même s'il existe actuellement plusieurs solutions efficaces afin de lutter contre les cinétoses, et plus spécifiquement le mal du simulateur, peu sont utilisables dans le cas de la simulation de conduite chez Renault. À défaut, elles ne peuvent du moins être utilisées que dans des cas particuliers, ne convenant donc pas à tous les besoins de Renault.

Les médications : Les médications sont une solution assez efficace pour la simulation. Elles sont particulièrement utilisées pour la simulation de vols militaires. Cependant, dans le cadre de la simulation de conduite Renault, cette solution est difficilement applicable car elle nécessite des autorisations pour utiliser ces médicaments (comités d'éthique et

FIGURE 3.15 – Bracelets élastique d'acupressure simple (www.amazon.fr)

FIGURE 3.16 – Bracelet d'acustimulation électrique RELIEFBAND [*Bracelet*]

autorisation de projets) ainsi qu'une présence médicale afin de les administrer et surveiller les sujets. De plus, les effets secondaires sont assez importants, pouvant réduire la possibilité de sujets volontaires.

L'habituation : L'habituation est une solution envisageable chez Renault, cependant cela mobilise grandement le simulateur pour le temps d'habituation des pilotes ainsi que le maintien de cette habituation. Par ailleurs, les algorithmes de contrôles évoluant, il faut refaire cette habituation. De plus, pour que les différentes études soient significatives, cela implique la nécessité d'un grand nombre de participants, donc de pilotes habitués. Sans compter qu'il faut réaliser cette adaptation pour chacun des simulateurs, l'habituation étant spécifique. Pour finir, de nombreuses études ont besoin de groupes de sujets représentatifs des conducteurs ordinaires, ce qui n'est pas compatible avec un groupe de pilotes entrainés.

Autres solutions : La mise en place d'un IVB implique un casque spécifique, ou alors des écrans semi-transparents dans les simulateurs. Cette technique réduit, de plus, grandement l'immersion du conducteur. Les lumières stroboscopiques seraient aussi dérangeantes car elles atténuent la luminosité des écrans rétroprojetés, à moins d'être utilisés sous forme de lunettes stroboscopiques. Le nez virtuel ne s'applique qu'au simulateur équipé de visiocasque et son effet est moindre. Réduire le champ de vision implique une modification des écrans des simulateurs, empêchant par ailleurs la vision latérale, nécessaire en cas de dépassement et de manœuvre. La restriction de mouvement est très intrusive pour le conducteur, nuisant à l'immersion et aux tâches nécessaires en voiture. La stimulation galvanique vestibulaire est, pour l'instant, assez expérimentale et réservée à certains laboratoires et commence à arriver sur le marché. Les lunettes Boarding Glasses ne sont, quant à elles, pas applicables aux simulateurs car les cinétoses sont induites visuellement ou par un mouvement non concordant, risquant de renforcer le conflit visuo-vestibulaire.

C'est pourquoi, dans la suite de cette thèse, nous allons nous intéresser à trouver de nouvelles solutions et techniques destinées à réduire le mal du simulateur qui soient applicables dans le cadre de la simulation de conduite DIL chez Renault, et plus particulièrement en lien avec la validation du véhicule autonome.

CHAPITRE 4

ÉTUDE : AJOUT DE MODALITÉS VIBRATOIRES

Pour faire suite à cette étude biographique et à l'état de l'art, nous avons décidé d'examiner les possibles effets de modalités vibratoires sur le mal du simulateur. En effet, les systèmes vibratoires étant de plus en plus présents dans les simulateurs afin de fournir une meilleure immersion, il peut être intéressant de voir leurs potentiels impacts sur les cinétoses.

4.1 Les vibrations pour la simulation de conduite

De plus en plus de simulateurs de conduite s'équipent de systèmes vibratoires permettant de reproduire des vibrations lors de la conduite simulée. Ces vibrations simulent les vibrations du moteur et les vibrations dues au contact des roues avec le sol. Ces vibrations nous intéressent car elles permettent à l'utilisateur d'avoir, à travers le sens proprioceptif, des informations supplémentaires (kinesthésiques) sur ses déplacements. Les autres sens étant déjà très sollicités lors de la tache de conduite, les informations vibratoires peuvent diminuer la charge mentale sans surcharger les autres sens, que ce soit en conduite réelle ou simulée [J. B. F. Van Erp et Van Veen 2004 ; McGrath 2000].

4.1.1 Amélioration de l'immersion

L'argument souvent mis en avant pour l'installation de systèmes vibratoires en simulateur de conduite est l'amélioration du réalisme et de l'immersion. Cela permet ainsi une

meilleure expérience aux conducteurs et augmente leur présence [1] dans le monde virtuel.

Par ailleurs, les vibrations de la cabine d'un véhicule proviennent principalement du contact avec la chaussée et du bloc moteur (voir section suivante). Ces vibrations dépendent donc de la vitesse du véhicule, donnant une information de plus au conducteur à travers le son et les vibrations du siège, volant, etc. En effet, plusieurs études récentes mettent en évidence ces effets d'ajout de vibrations du siège et du sol sur des sujets lors de simulation, permettant ainsi l'amélioration des sensations de mouvement propre [Harris et al. 2000 ; Schulte-Pelkum et al. 2004 ; Riecke, Schulte-Pelkum, Caniard et Bulthoff 2005 ; Plouzeau 2013]. Ces informations kinesthésiques, si elles sont en accord avec le visuel, viennent augmenter l'effet de vection, l'impression de mouvement de soi. Elles sont notamment efficaces pour percevoir les accélérations et les changements de vitesse. Ces indices kinesthésiques peuvent même aider à une meilleure appréciation de la vitesse perçue en simulation, alors qu'elle est souvent minimisée [Sandin J. et al. 2016].

4.1.2 Vibrations d'une voiture sur route

Dans le cas d'une situation de conduite réelle, on retrouve deux principales sources de vibrations dans l'habitacle d'une voiture : le groupe motopropulseur et le contact pneu/route. Ces vibrations sont différentes selon les positions de mesure dans le véhicule. En effet, chaque élément de la voiture joue le rôle de filtre modifiant les vibrations, par exemple le siège joue le rôle d'amortisseur.

Les vibrations produites par le groupe motopropulseur ont des fréquences supérieures à 50 Hz. C'est-à-dire qu'elles sont dans le spectre des fréquences audibles (20 à 20 000 Hz) [Leclere et al. 2006] et ne nous intéressent donc pas directement dans notre étude, celles-ci étant déjà reproduites par les systèmes sonores en place dans les simulateurs.

Les caractéristiques des vibrations générées par le contact pneu/route dépendent surtout de la qualité de la route ainsi que de la vitesse du véhicule, mais aussi du type de véhicule, des suspensions, du gonflage, de son chargement, etc. Selon l'orientation des vibrations, le conducteur les appréhende de manière différente. Les vibrations orientées selon l'axe Y (cf. 4.1), principalement ressenties lors de virages, sont assimilées à l'adhérence de la voiture à la route. Elles vont, de plus, représenter un sentiment de sécurité. Tandis que, d'autre part, les oscillations lentes (< 1 Hz) suivant l'axe X et particulièrement l'axe Z peuvent induire du mal des transports [Benson 2002].

Suivant une étude vibratoire menée sur plusieurs véhicules et différentes routes avec des mesures sur le plancher et l'assise [Griffin 1978], il a été observé que :
pour tous les véhicules et sur toutes les routes, 90 % des fréquences étaient inférieures à 38 Hz dans la direction avant/arrière (axe X), 18 Hz dans la direction latérale (axe Y) et 12 Hz dans la direction verticale (axe Z). Pour chacun des trois axes, 90 % ou plus

1. Le concept de « présence » fait référence au phénomène d'avoir le sentiment et l'illusion d'être et d'agir dans le monde simulé comme si c'était un environnement réel [Hartmann et al. 2015 ; Bouvier 2009]

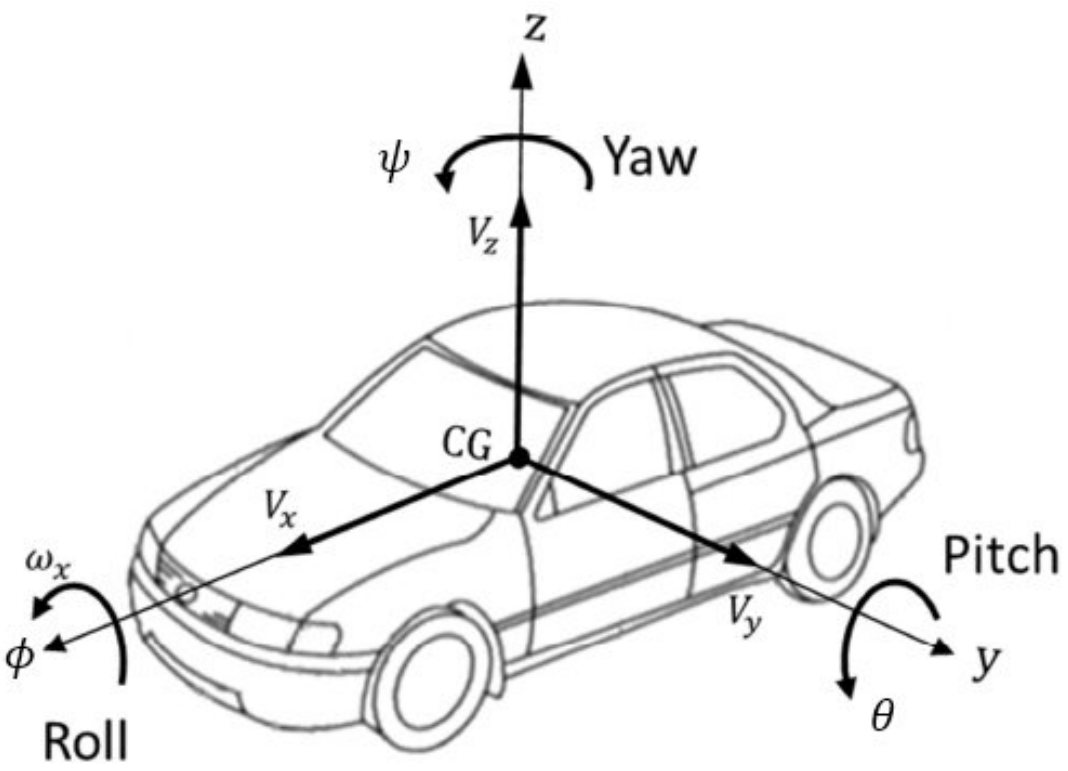


FIGURE 4.1 – Axes véhicules normes ISO 8855-2011

des fréquences étaient supérieures à 1 Hz. La bande de fréquence prépondérante dans les faibles fréquences variait considérablement d'un véhicule à l'autre, mais se situait le plus souvent dans la gamme de 1 à 3 Hz pour les vibrations antéro-postérieurs et latérales, et dans la gamme de 6 à 12 Hz pour les vibrations verticales [GRIFFIN 1978].

4.1.3 Restitution vibratoire en simulation de conduite

Les vibrations pour améliorer l'immersion sont de plus en plus répandues et ne se limitent pas uniquement à la simulation. Ce type d'installations se retrouve pour des cinémas, des parcs d'attractions, la réalité virtuelle, du gaming etc. Il existe actuellement plusieurs technologies différentes :

Caissons infra-basses : Une première approche dans la restitution de ces vibrations peut s'effectuer avec un caisson de basses. Cependant, ceux-ci produisant des sons audibles, ils descendent rarement en dessous 30 Hz. Il existe ensuite des caissons (ou vibreurs) infra-basses permettant une gamme de fréquences allant jusqu'à en général 5 Hz, qui peuvent être fixés sous l'assise (cf. figure 4.2b) ou sur le plancher du simulateur (cf. figure 4.2a). Dernièrement, sont aussi apparus les caissons infra-basse portatifs (cf. figure 4.2c), permettant une transmission directe des vibrations mais perdant la spatialité.

(a) Caisson EarthQuake® MQB-1 MiniQuake

(b) Vibreur Buttkicker® Gamer 2

(c) Caisson de basses personnel BassMe®

FIGURE 4.2 – Exemples de caissons infra-basses

Vérins et plateformes de mouvements : Une solution simple est d'utiliser le système de mouvement du simulateur s'il en possède un. Cependant, cette solution est limitée par la mécanique et l'inertie de ceux-ci, surtout sur les grands simulateurs. Cette solution est plutôt envisageable sur les sièges de simulation, ayant des possibilités de restitution plus haute fréquence. Ensuite, il existe des systèmes de vérins spécialement dédiés aux vibrations (cf. figure 4.3), pouvant même être combinés avec une plateforme de mouvement dynamique (voir simulateur ROADS).

(a) Platforme vibrante ProSimu® 1000

(b) Simulateur équipé de vérins vibrants D-BOX®

FIGURE 4.3 – Exemples de systèmes vibrants pour la simulation de conduite

4.2 Effets des vibrations du corps

Le corps humain est une structure complexe, active, intelligente et dynamique, il ne faut donc pas s'attendre à une conséquence unique, simple ou facilement prévisible. Les vibrations peuvent être une nuisance, voire une source de nausée, tout comme une source de plaisir ou une cause de douleur. Comme de nombreux paramètres humains, cela dépend de nombreux facteurs dont, entre autres, les caractéristiques des vibrations, les caractéristiques de la personne exposée, les activités de la personne exposée et d'autres aspects de l'environnement. On ne peut résumer les effets des vibrations simplement en recommandant d'éviter une certaine fréquence de vibrations, ou en définissant une seule courbe représentant toutes les réponses à toutes les fréquences [Griffin 1990]. Pour exemple, avec une approche purement mécanique, chaque section du corps peut être modélisée par un système masse + ressort + amortisseur (cf. figure 4.4). Le corps humain ne réagit pas non plus à toutes les fréquences de vibrations. Le corps humain est un système fortement amorti et, par conséquent, lorsqu'une partie de celui-ci est excitée à sa fréquence naturelle, il résonnera sur une gamme de fréquences au lieu d'une seule fréquence [Lucena et al. 2010].

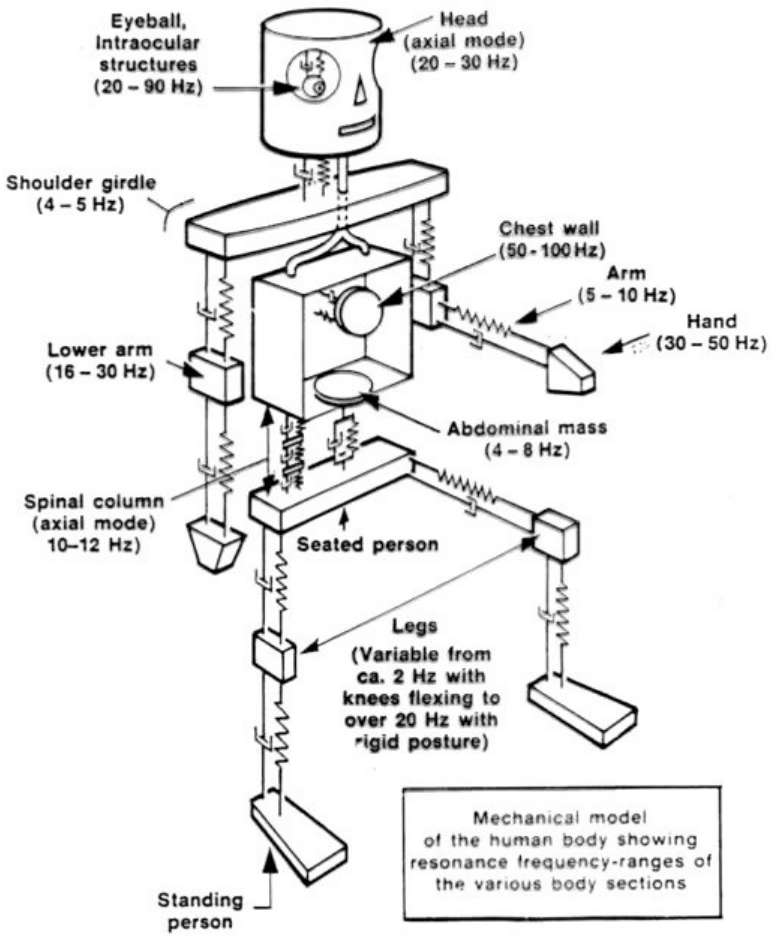


Figure 4.4 – Modèle humain de résonance « Sven Jr » de Sven-Olof Emanuelsson [Lucena et al. 2010]

Dans le cas d'une assise sur un siège d'automobile souple classique, le siège peut augmenter ou diminuer considérablement le mouvement en fonction de la fréquence et de la direction des vibrations. Aux basses fréquences (inférieures à 1 ou 2 Hz), la dynamique de la plupart des sièges a peu d'influence, mais dans la région de 4 Hz, ils amplifient sensiblement les vibrations verticales. À une fréquence plus élevée, de nombreux sièges atténuent les vibrations verticales et au-dessus d'environ 10 Hz, l'influence du mouvement est réduite.

4.2.1 Effets sur le corps

Les vibrations globales du corps se produisent lorsque le corps est appuyé sur une surface qui vibre. Une vibration locale se produit lorsqu'un ou plusieurs membres sont en contact avec la surface vibrante. Les vibrations locales du corps peuvent provoquer des vibrations dans tout le corps [Griffin 1990]. Les personnes assises exposées à des vibrations globales du corps sont souvent simultanément exposées à des vibrations locales de la tête (par exemple à partir d'un appui-tête), des mains (par exemple sur un volant) et des pieds (par exemple sur le sol). Des vibrations peuvent également pénétrer dans le corps à la suite d'un contact avec le dossier d'un siège. Les vibrations du siège fournissent des signaux plus proprioceptifs, mais peuvent aussi influer sur les capteurs de mouvement abdominal et fournir également un signal vestibulaire subtil.

Les vibrations globales du corps peuvent comporter des risques pour la santé et la sécurité s'ils ne sont pas encadrés, en particulier des lombalgies et des traumatismes de la colonne vertébrale. Pour la vibration des membres, cela peut mener à des troubles vasculaires, osseux ou articulaires, neurologiques ou musculaires. C'est pourquoi, suivant des directives européennes (2002/44/EC) et le Code du travail (articles R. 4443-1 et R. 4443-2), il est important de ne pas dépasser, pour 8 heures quotidiennes de travail, la valeur seuil d'exposition journalière de 1,15 $\mathrm{m\,s^{-2}}$, avec l'installation d'une surveillance et des actions à partir de 0,5 $\mathrm{m\,s^{-2}}$.

Il a été démontré que les vibrations pouvaient influer la proprioception. En effet, certains types de vibrations des muscles ou tendons peuvent induire des illusions sur la position du membre [Petroni et al. 2015]. Par exemple, une vibration aux alentours de 100 Hz du tendon du muscle biceps ou triceps a produit l'illusion que le muscle vibré était étiré [Roll et Vedel 1982]. Une vibration aux alentours de 80 Hz du muscle fléchisseur du poignet peut, quant à elle, donner l'illusion d'un poignet plié dans des positions impossibles [Craske 1977]. Ces résultats s'expliquent par des décharges nerveuses des fuseaux musculaires provoquées par les vibrations (60 à 100 Hz), interprétées comme étant dues à l'excitation des muscles par étirement. Cela induit donc une mauvaise estimation de la tension du muscle, le calcul de la position se faisant alors principalement par le mouvement attendu et pouvant ainsi mener à des configurations normalement impossibles.

Des troubles des fonctions sensorielles peuvent survenir lors d'une exposition aux vibrations en raison de leur excitation par la vibration, menant par extension à des troubles de la fonction posturale [Griffin 1990]. Les vibrations peuvent dégrader les informations

perçues par les systèmes sensoriels, par exemple en introduisant un bruit qui masque les signaux ou par la production de signaux qui ne sont pas correctement interprétés. Ainsi, les vibrations peuvent être utilisées à des buts thérapeutiques de rééducation posturale [Nes et al. 2004 ; Bogaerts et al. 2007].

Le système vestibulaire peut aussi être perturbé par des vibrations, notamment des illusions visuelles et posturales et le déclenchement de nystagmus [2] [J. R. Lackner et Graybiel 1974 ; Griffin 1990]. Ces illusions sont particulièrement efficaces sur la plage de fréquence de 60 à 90 Hz.

4.2.2 Effets sur les cinétoses

Comme abordé précédemment (cf. 3.3.2), les vibrations jouent un rôle dans la gravité des symptômes du mal du simulateur. Cependant, les oscillations à l'origine du problème ont des fréquences inférieures à environ 0,5 Hz (cf. figure 4.5) [Griffin 1990 ; O'Hanlon et M. E. McCauley 1974]. Or, les vibrations de véhicule évoquées précédemment (contact pneu/route) ont des plages de fréquences plus élevées (90 % > 1 Hz). Les vibrations cinétogènes sont plutôt dues aux déplacements du véhicule et de la route.

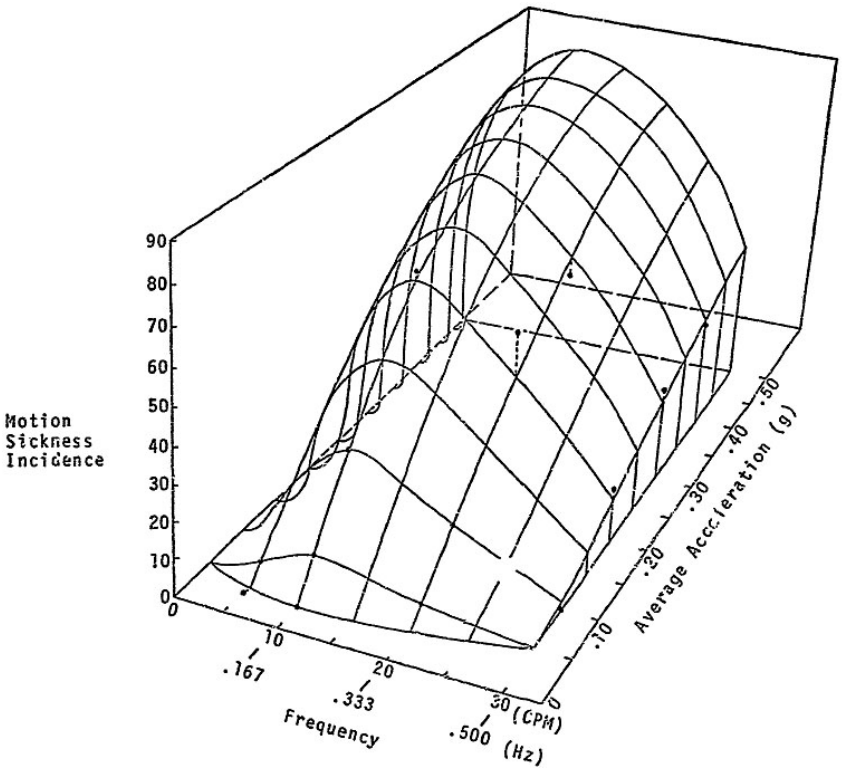


Figure 4.5 – Effets des vibrations basses fréquences sur les cinétoses [O'Hanlon et M. E. McCauley 1974]

2. Le nystagmus est un mouvement d'oscillation involontaire et saccadé du globe oculaire causé par une perturbation de la coordination des muscles de l'œil.

Sur la base de ces hypothèses, il a été prouvé que le mal des transports dû aux mouvements à basses fréquences peut être réduit en ajoutant des vibrations à hautes fréquences directement au niveau de la tête [Bos, Jelte E. 2015]. L'ajout de vibrations haute fréquence ($> 1\,\mathrm{Hz}$) à un mouvement cinétogène de fréquence faible peut alors diminuer la sensibilité globale des systèmes perceptifs en les submergeant, entrainant ainsi moins de perception des mouvements nauséeux et donc moins de cinétoses. Dans les théories des conflits neurosensoriels ainsi que de la verticale subjective, le conflit est dominé par un retard de phase dû à un processus faisant la distinction entre accélérations gravitationnelles et inertielles telles que ressenties par les otolithes. Ce conflit peut être atténué en diminuant un retour interne ou gain de Kalman [Oman 1990 ; Selva et Oman 2012]. L'ajout d'un bruit aléatoire non nauséeux à l'entrée des signaux sensoriels peut ainsi diminuer l'ampleur du mal du simulateur causée par un mouvement à basse fréquence [Mirzaei 2014]. Cependant, fournir des vibrations à la tête peut être incompatible avec certaines études en simulateur et vraiment dérangeant pour le conducteur. Finalement, il a été montré que l'ajout de vibrations aléatoires à lui seul ne suffit pas à éliminer le conflit et le mal de simulateur [Casali 1985].

4.3 Hypothèses de l'étude

Dès les années 1990, M. McCauley et Sharkey [1992] ont envisagé des solutions alternatives moins couteuses afin de limiter le mal du simulateur, telles que l'ajout d'un siège vibrant. Cette solution avait pour but de fournir des informations proprioceptives réduisant le conflit provoqué par les seules informations visuelles de mouvement. Or, actuellement, de plus en plus de simulateurs embarquent ce type de technologies. Cependant, peu d'études s'appliquent à étudier leur potentiel contre le mal du simulateur. Par conséquent, nous avons voulu tester si différents types de vibrations appliquées au siège pouvaient avoir une influence sur le mal du simulateur.

Comme vu précédemment, de simples vibrations aléatoires ne suffisent pas à elles seules à réduire les symptômes [Casali 1985]. C'est pourquoi nous allons nous intéresser à deux types de vibrations, des vibrations réalistes et des vibrations perturbatrices décrites ci-après.

4.3.1 Des vibrations réalistes

Tel qu'abordé précédemment, des vibrations réalistes et cohérentes avec la simulation augmentent l'immersion, la sensation de vection [Harris et al. 2000 ; Schulte-Pelkum et al. 2004 ; Riecke, Schulte-Pelkum, Caniard et Bulthoff 2005 ; Plouzeau 2013] et même l'appréciation de la vitesse [Sandin J. et al. 2016]. Elles peuvent fournir des indices kinesthésiques supplémentaires concernant la vitesse et les accélérations longitudinales. Si ces signaux sont conformes à la perception visuelle du mouvement, ils induisent une meilleure sensation de vection, de déplacement de soi et peuvent donc mener à réduire les conflits sensoriels et neuronaux.

De plus, par la vibration du corps entier et par le contact de la tête à l'appui-tête, ces vibrations peuvent atteindre le système vestibulaire, et ainsi fournir une illusion de mouvement vestibulaire [J. R. Lackner 2014] qui est absente dans le cas d'un simulateur fixe.

Par ailleurs, pour les conducteurs expérimentés, il est normal de ressentir ce genre de vibrations dans l'habitacle de leur véhicule en situation de conduite réelle. Ainsi, la présence de ces vibrations en simulation permettra plus de cohérence avec les expériences précédentes en conduite réelle, favorisant de ce fait le réalisme, l'immersion, et les schémas de perceptions sensorielles. Ainsi, suivant la théorie du réarrangement sensoriel et neuronal, les conflits de schémas sensoriels étant moindres, cela devrait réduire l'occurrence des cinétoses. De surcroit, l'absence de ces vibrations peut donner une impression de « véhicule flottant » (pas de contact pneu/route) assez gênante pour les conducteurs et leur perception des mouvements en simulation de conduite.

En somme, nous supposons que des vibrations réalistes et cohérentes peuvent réduire l'intensité et l'occurrence du mal du simulateur dans le cas de la conduite automobile.

4.3.2 Des vibrations perturbatrices

Il a été vu précédemment que des vibrations sur certaines gammes de fréquences peuvent perturber la perception, et particulièrement le sens proprioceptif. Ce type de vibrations appliquées à tout le corps pourrait perturber la proprioception globale, qui se baserait alors uniquement sur le mouvement attendu, donc celui de la simulation.

De plus, par la vibration du corps entier et par le contact de la tête à l'appui-tête, ces vibrations peuvent atteindre le système vestibulaire, pouvant par la même occasion stimuler celui-ci et mener à des illusions de mouvements vestibulaires, les gammes de fréquences étant assez similaires.

Une autre hypothèse serait que les vibrations pourraient avoir un effet de masque sur les sens proprioceptif et vestibulaire. Ceux-ci étant en effet surchargés par les vibrations, cela laisserait peu de perception du vrai mouvement, atténuant possiblement les conflits sensoriels.
De plus, ces vibrations pourraient aussi servir de distraction mentale par son activité [Bos, Jelte E. 2015]. En effet, le mal des transports est moins susceptible de se produire lorsque l'attention est dirigée vers des évènements autres que lorsque les sujets sont concentrés sur leurs propres ressentis.

En somme, nous supposons que des vibrations aléatoires dans la gamme de fréquences 60 à 120 Hz pourraient atténuer les symptômes de mal du simulateur dans le cas de la simulation de conduite.

4.4 Protocole expérimental

Suite aux hypothèses posées précédemment, trois configurations de vibrations pour la simulation de conduite DIL ont été considérées dans cette étude :

- Premièrement, une configuration de référence, où il n'y avait aucune vibration pendant la simulation de conduite, afin de pouvoir comparer à une possible évolution des symptômes de mal de simulateur avec des vibrations.
- Ensuite, une deuxième configuration avec des vibrations réalistes. Ces vibrations sont simulées de manière cohérente avec la simulation, grâce au logiciel de gestion de simulation de conduite SCANeR™ Studio.
- Dernièrement, la troisième configuration avec des vibrations perturbatrices. Ces vibrations ont été créés de manière aléatoire dans le domaine fréquentiel pouvant perturber la perception proprioceptive et vestibulaire.

Cette étude s'est déroulée à l'Institut Image de Chalon-sur-Saône dans le cadre du laboratoire commun Renault / Arts et Métiers Paris-Tech, le LiV.

4.4.1 Le Simulateur

Pour cette étude nous avons utilisé le simulateur dynamique SI^{2}M (SIMulation IHM & Interaction) de l'Institut Image pouvant reproduire les gammes de fréquences nécessaires à cette étude.

Cette plateforme de simulation, développée par OKTAL, se compose d'un siège automobile avec des pédales et un volant instrumentés. Le tout est monté sur une plateforme rigide actionnée par quatre vérins D-BOX® (cf. figure 4.6). Ces actionneurs permettent une légère liberté de mouvement angulaire faisant ressentir de façon limitée les inclinaisons (virages, ralentisseur, accélérations, etc.). Leur réactivité permet toutefois de faire ressentir le « jerk », ayant également un rôle important dans la perception du mouvement (cf. chapitre 2) et surtout les vibrations de la texture de la route dans la gamme de fréquences nous intéressant pour cette étude (cf. tableau 4.1). L'immersion sonore se fait grâce à un système de son 2.1 disposé derrière le volant.

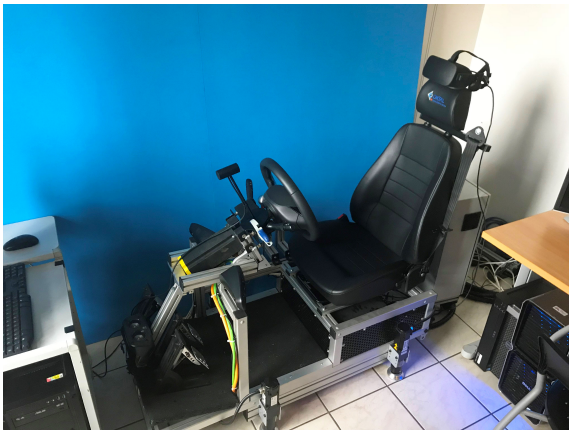
	Performances sous charge maximale
Capacité de levage maximale	114 kg
Course maximale	38,1 mm
Vitesse maximale	100 mm s^{-1}
Accélération maximale	±1 g
Gamme de fréquences	0-100 Hz

Table 4.1 – Tableau des performances pour un vérin (D-Box [*Simulation*])

Cette plateforme de simulation automobile a été conçue pour fonctionner dans un CAVE (cf. figure 4.6a), ainsi qu'avec des casques de réalité virtuelle (cf. figure 4.6b). Pour cette étude, nous avons utilisé le casque de réalité virtuelle Oculus Rift CV1 pour le rendu visuel (configuration visible sur la figure 4.6b) et aussi sonore, car le bruit des vibrations couvrait celui des enceintes. Le taux de rafraichissement visuel était cadencé à 75 Hz par le logiciel.

Ce simulateur fonctionne grâce à trois ordinateurs : un pour gérer les mouvements de la plateforme, le second pour gérer le rendu visuel dans le casque et le dernier, le PC maitre, afin de gérer les deux autres et grâce au logiciel SCANeR™ Studio (cf. figure 4.7) de gérer la simulation, le scénario, etc.

(a) En configuration dans un CAVE



(b) En configuration avec un Oculus rift

FIGURE 4.6 – Simulateur automobile dynamique SI^{2}M

4.4.2 Scénario de conduite

Le scénario a été développé avec le logiciel de simulation de conduite SCANeR™ Studio 1.7 (cf. figure 4.7). Les participants au volant d'un Renault Scenic devaient effectuer trois fois le scénario de conduite, une fois par configuration. Afin d'avoir une meilleure reproductibilité (en plus du contexte industriel) la conduite était autonome, de sorte à ce que chaque participant ait les mêmes stimulations entre eux, mais aussi entre les différentes configurations afin de faciliter la comparaison.

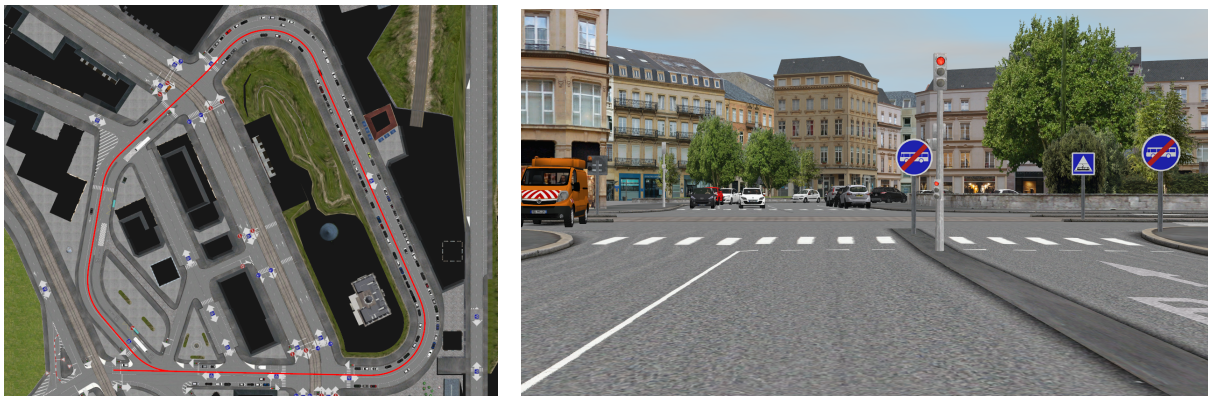
Nous avons choisi une conduite en milieu urbain afin d'avoir un scénario plus cinétogène, plus diversifié en situations et aussi moins ennuyant pour les sujets. En effet, le milieu urbain augmente les mouvements des véhicules (virages, accélérations, etc.), maximisant donc le nombre de situations cinétogènes que des vibrations pourraient potentiellement améliorer. De plus, les nombreux repères visuels externes augmentent les effets de vection (cf. figure 4.8b). Afin d'éviter l'ennui et pour le réalisme, quelques voitures en circulation ont été simulées sur la route, mais pas de piétons.

Les participants étaient donc placés dans un véhicule autonome conduisant en milieu urbain et effectuant trois tours du même circuit (cf. figure 4.8a) pour une durée totale

FIGURE 4.7 – Logiciel de simulation de conduite SCANeR™ Studio

de presque 5 minutes afin de limiter l'ennui et maximiser l'attention. La voiture roulait à 50 km/h avec quelques ralentissements à 30 km/h afin d'avoir des accélérations et décélérations longitudinales. Tous les feux de signalisation étaient au vert afin que la voiture ne s'arrête pas. La voiture autonome accélérait au début de la simulation avec une accélération lente de $1\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ et s'arrêtait à la fin de la simulation avec une décélération de $-1\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ également, jusqu'à l'arrêt total. L'installation et la sortie de la simulation se faisaient dans une voiture à l'arrêt avec un fondu au noir afin que les participants puissent mettre et retirer le casque tranquillement.

Le scénario était suffisamment cinétogène pour que des personnes habituées ressentent une petite gêne, mais pas assez afin d'éviter d'amener jusqu'aux vomissements les personnes les moins habituées (qui étaient libres d'interrompre à tout moment).



(a) Circuit du scénario (b) Aperçu de la vision du conducteur

FIGURE 4.8 – Aperçu du scénario de conduite

4.4.3 Génération des vibrations

Le rendu vibratoire s'est fait grâce au système de mouvements D-BOX® (cf. figure 4.9), composé de quatre petits vérins fixés sous la plateforme, permettant des vibrations jusqu'au moins 100 Hz sous charge maximale. Dans les deux configurations de vibrations, la dose administrée était bien inférieure aux doses recommandées.

FIGURE 4.9 – Plateforme vibratoire D-BOX®

Les vibrations réalistes

La génération de vibrations réalistes et cohérentes dépend des caractéristiques de la conduite virtuelle, c'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser l'option dédiée du logiciel de simulation SCANeR™ Studio. Cette option permet de générer des vibrations sur la plateforme qui peuvent s'ajouter à ses mouvements. Ces vibrations sont définies dans le code source grâce à une méthode de bruit Perlin et dépendent de la surface de la route (granularité), de la vitesse du véhicule virtuel et du couple appliqué au volant. De plus, ce rendu est spatialisé, permettant ainsi de rendre des vibrations latérales et longitudinales. Au cours de l'expérience, le véhicule était sur de l'asphalte et roulait principalement à 50 km/h avec quelques ralentissements à 30 km/h. Le signal vibratoire a été mesuré grâce à la boucle de contrôle des vérins. Par ailleurs, une analyse de la répartition de la puissance spectrale montre des pics de fréquences environ tous les 3,5 Hz et certains plus élevés à 21 Hz et 7 Hz (cf. figure 4.10). La puissance du signal était réglée pour être similaire à une voiture qui n'absorbe pas excessivement les vibrations de la route.

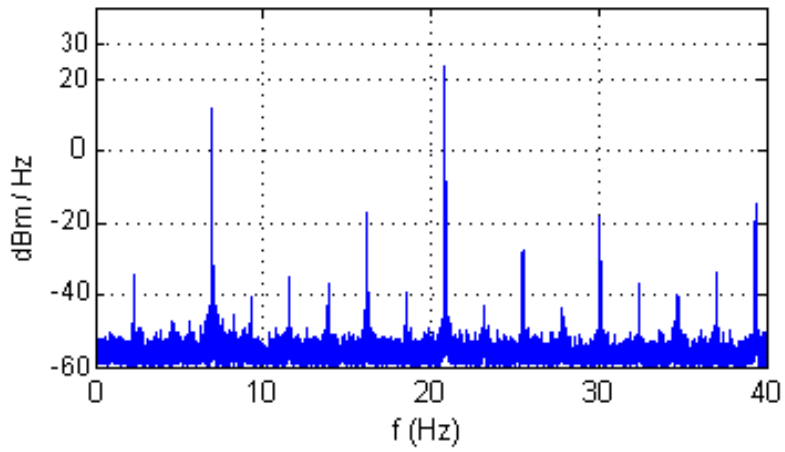
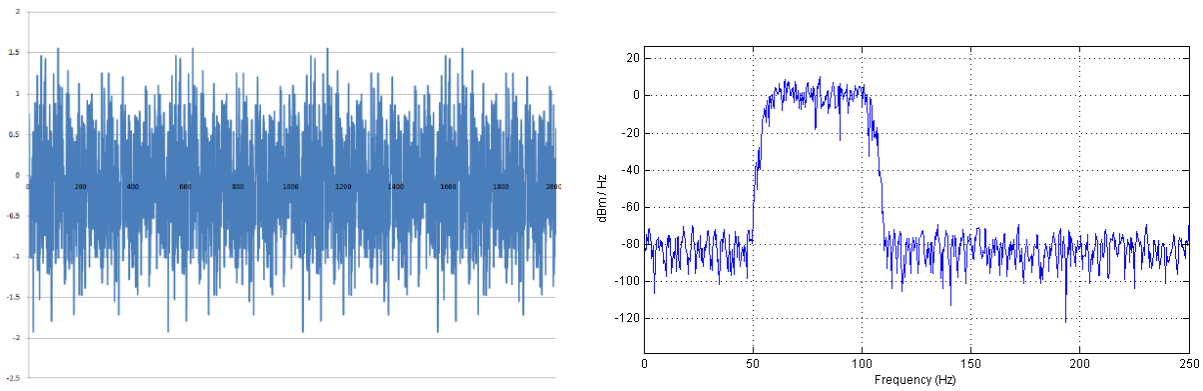


FIGURE 4.10 – Densité spectrale de puissance du signal vibratoire mesuré

Les vibrations perturbatrices

Pour les vibrations perturbatrices, il nous a fallu créer le signal vibratoire à envoyer aux vérins. Ce signal a été conçu et simulé avec Matlab® Simulink. Ce signal a été réalisé grâce à la génération d'un signal de bruit blanc, ensuite filtré avec un filtre passe-bande sur la gamme de fréquences nous intéressant. Le filtre avait une bande passante de 60 à 100 Hz avec une atténuation de 80 dB jusqu'à 50 Hz et 120 Hz. Ce signal a été simulé sur 5 secondes (cf. figure 4.11a et rebouclé afin de couvrir l'entièreté du scénario de conduite. Le signal restitué par les vérins a été mesuré grâce à la boucle de contrôle de ceux-ci, nous donnant la répartition de la puissance spectrale correspondante à nos besoins (cf. figure 4.11b).



(a) Aperçu du signal vibratoire

(b) Densité spectrale de puissance du signal mesuré

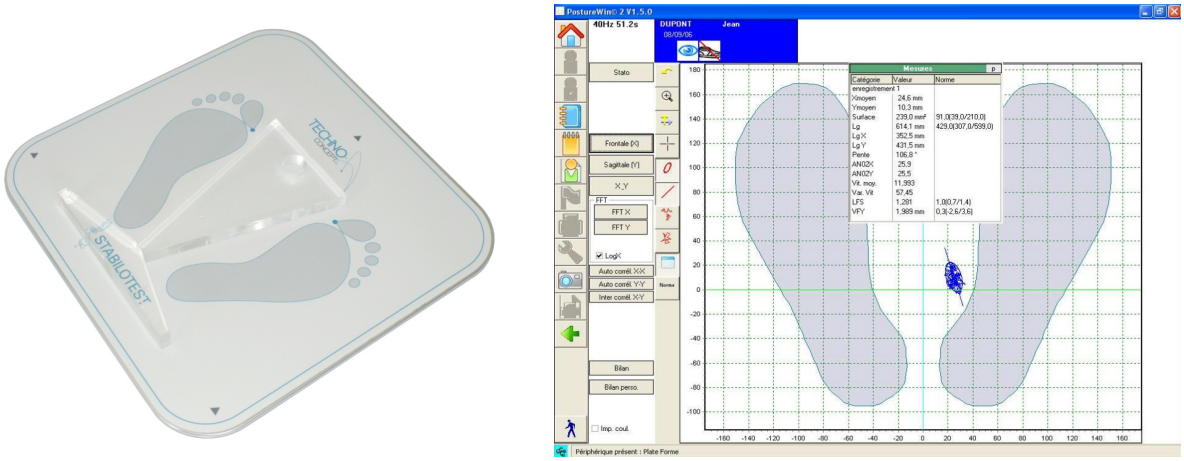
FIGURE 4.11 – Mesure du signal vibratoire restitué

4.4.4 Mesures

Premièrement, les sujets étaient amenés à remplir anonymement un questionnaire afin d'évaluer la population testée ainsi que leurs propensions au mal du simulateur. Ce questionnaire reprend quelques critères du short MSSQ [J. F. Golding 2006a] (cf. annexe p. II), comme l'âge, le sexe, leur habituation, etc. Ce même questionnaire était complété à la fin pour connaitre leurs préférences subjectives entre les configurations ainsi que les différents commentaires. Celui-ci était ensuite complémenté par un moment d'échange afin de répondre aux questions des sujets et d'obtenir d'autres remarques.

Comme vu antérieurement (cf. 3.3.3), il existe plusieurs moyens d'évaluer le mal du simulateur. Pour cette étude nous avons choisi d'utiliser deux moyens différents : un subjectif (questionnaires) et un objectif (mesure d'un état physique). Pour le questionnaire, nous avons utilisé la version traduite du Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [R. S. Kennedy, Lane et al. 1993 ; Bouchard et al. 2007], qui est le moyen le plus utilisé et reconnu afin de mesurer le mal du simulateur. Les participants ont donc été invités à remplir ce SSQ (cf. annexe p. III) avant et après chaque conduite sur une configuration différente (cf. figure 4.13). Cela afin d'évaluer l'évolution des symptômes de cinétoses causés par chaque configuration de vibrations en simulation.

Le mal du simulateur a également été évalué de manière plus objective avec la mesure de l'évolution du balancement postural [Smart et al. 2002 ; R. S. Kennedy et Stanney 1996]. Cette mesure a été réalisée grâce à la plateforme de mesure d'équilibre (cf. figure 4.12a) Stabilotest© de TechnoConcept [2007]. Cette plateforme enregistre le déplacement de la projection du centre de gravité sur le sol (cf. figure 4.12b). De même que pour le questionnaire, les mesures ont été prises avant et après chaque conduite afin de quantifier l'instabilité posturale générée par la configuration testée. Les enregistrements ont été réalisés sur une période de 51,2 secondes, à une fréquence d'échantillonnage de 5 Hz afin de respecter les normes AFP 85. Pendant la mesure, les participants étaient invités à garder leurs bras le long du corps tout en regardant une cible, située droit devant eux sur le mur à un mètre, et en essayant de rester aussi immobile que possible.



(a) Plateforme de mesure Stabilotest©

(b) Exemple de mesure postural

Figure 4.12 – Mesure du balancement postural [TechnoConcept 2007]

Afin d'évaluer l'instabilité posturale, nous avons recourus à deux indicateurs. Premièrement, la magnitude spatiale, qui est estimée par la surface de l'ellipse de confiance contenant 90 % des positions de la projection du centre de gravité (norme AFP 85). Deuxièmement, nous nous sommes aussi intéressés à un indicateur plus récent, la multifractalité du balancement postural [Munafo, Curry et al. 2016]. Pour cela, nous avons utilisé une analyse des fluctuations multifractales détendues, MF-DFA, en utilisant un code open-source pour Matlab [Ihlen 2012]. Nous avons sélectionné une plage de mise à l'échelle minimale de 16 points de données avec 19 tailles croissantes de segment, uniformément espacés jusqu'au maximum de la longueur de la série chronologique.

4.4.5 Participants et déroulement

Une majorité des volontaires provenait des élèves de l'IUT de Chalon-sur-Saône ainsi que de l'Institut Image. Trente et un participants se sont portés volontaires pour cette étude (cf. figure 4.2), vingt-cinq hommes et six femmes. Les sujets étaient âgés de 19 à 69 ans avec un écart type de 14,7 ans. La moyenne était de 27,5 ans, ce qui est plutôt jeune. Tous les participants étaient en possession d'un permis de conduire valide, avec diverses expériences de conduite, depuis celle de jeune conducteur jusqu'à 50 ans de conduite régulière. La plupart était des conducteurs assez réguliers effectuant des trajets journaliers. Les sujets semblaient peu sensibles au mal des transports tout en étant assez habitués aux jeux-vidéos ainsi qu'à la simulation de conduite(ou la réalité virtuelle). Cette population semblait peu sensible au mal du simulateur.

	Âge (ans)	Nombres d'années de permis	Conduis tout les jours (0-4)	Sensible au mal des transports (0-4)	Joueur de jeux-vidéos (0-4)	Habitué aux simulations (0-4)
Moyenne	27,48	8,66	2,90	0,76	2,55	1,72
Écart-type	14,70	14,38	1,35	1,09	1,55	1,53

Table 4.2 – Statistiques de la population testée

Le déroulement de l'expérimentation est illustré ci-dessous par la figure 4.13. Les participants étaient informés du but de l'étude et étaient libres d'interrompre l'expérience à tout moment, surtout s'ils se sentaient trop fortement malades pendant une simulation. Tous les participants ont fait l'expérience de la conduite dans les trois configurations, afin de limiter des effets de différences interpersonnelles. Des pauses d'au moins 12 heures ont eu lieu entre chaque configurationafin d'éviter les interférences comme de l'accumulation des symptômes ou des effets d'accoutumance [Baltzley et al. 1989 ; D. M. Johnson 2007]. Cependant, dans la plupart des cas, il y a eu au moins 24 heures entre chaque condition. L'ordre des configurations était aléatoire parmi les participants afin d'éviter les effets de rang.

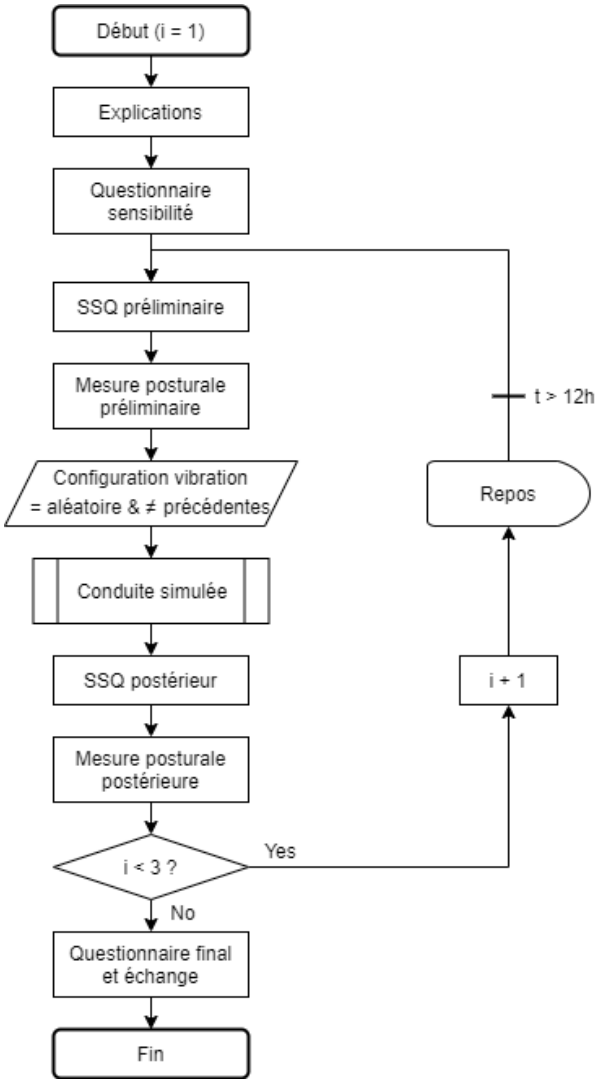


FIGURE 4.13 – Déroulement de l'expérimentation pour un sujet

4.5 Résultats

Nous allons présenter ici les résultats de cette étude. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées grâce au logiciel open-source R Project. Deux des sujets n'ont pas pu faire toutes les configurations de vibrations pour des raisons externes, par conséquent leurs résultats incomplets n'ont pas été pris en compte dans le reste de l'étude.

4.5.1 Simulator Sickness Questionnaire

Les participants ont réagi très différemment aux scénarios de conduite, les résultats sont donc assez dispersés (cf. figure 4.14), et les écarts-types sont assez proches des moyennes. Certains ont été peu affectés par la simulation (score proche de 0), alors que d'autres ont été réellement touchés et sont devenus assez nauséeux, surtout sans les vibrations (score jusqu'à 135). Cela implique également que la population ne peut pas être assimilée à une distribution normale, cela est confirmé par une non-validité des tests de normalité de Shapiro-Wilk ($p_{sans} = 1{,}5 \times 10^{-3}$; $p_{réalistes} = 1{,}1 \times 10^{-4}$; $p_{perturbatrices} = 2{,}8 \times 10^{-4}$). Cela confirme également que nous devions conserver les mêmes participants à travers les trois configurations afin de pouvoir comparer les données.

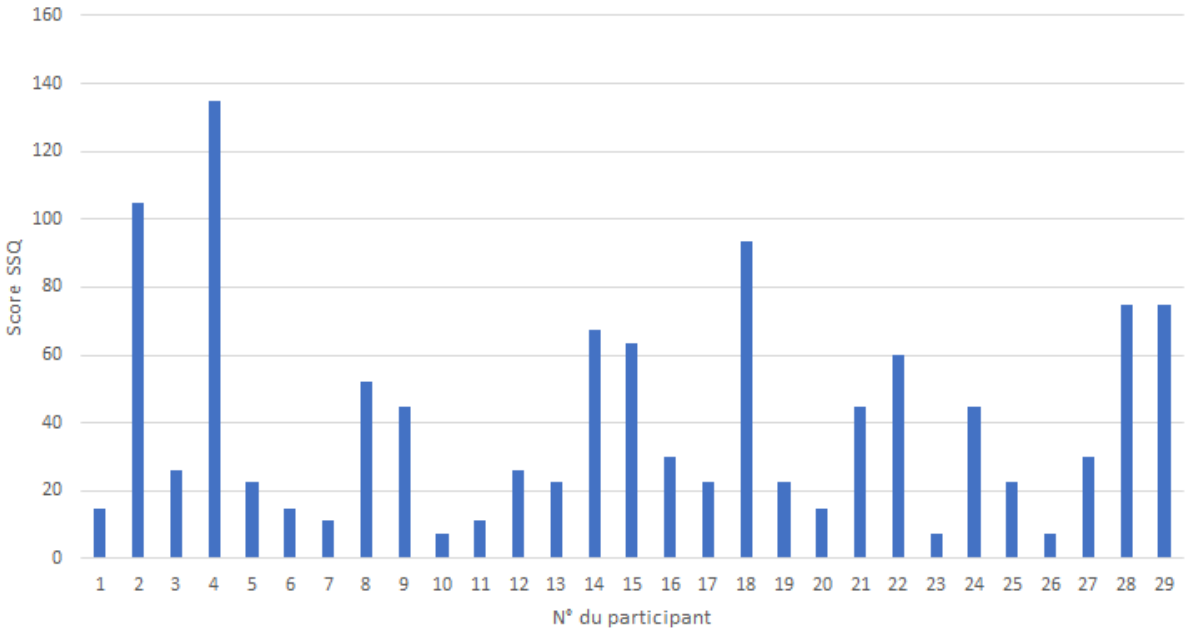


FIGURE 4.14 – Scores SSQ pour la configuration sans vibration

Pour la suite de l'analyse, nous avons utilisé le test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés. Il s'agit d'un test statistique non paramétrique permettant de comparer les effets d'un paramètre sur des échantillons corrélés comme une étude intra-sujets. Le test s'applique aux analyses à deux échantillons impliquant des mesures répétées ou par paires appariées. Nous avons utilisé un test non paramétrique, car les

échantillons ne peuvent pas être assimilés à une distribution normale.

En observant les notes moyennes dans les différents symptômes, on peut déjà constater une amélioration des scores avec des vibrations (cf. figure 4.15). Beaucoup de symptômes sont également observables, sans doute liés au casque de réalité virtuelle, comme des lourdeurs de la tête, la fatigue des yeux et la difficulté à faire le focus. En effet, le casque présentait quelques retards d'affichage ainsi qu'une fréquence d'affichage peu élevée (75Hz) imposée par le logiciel.

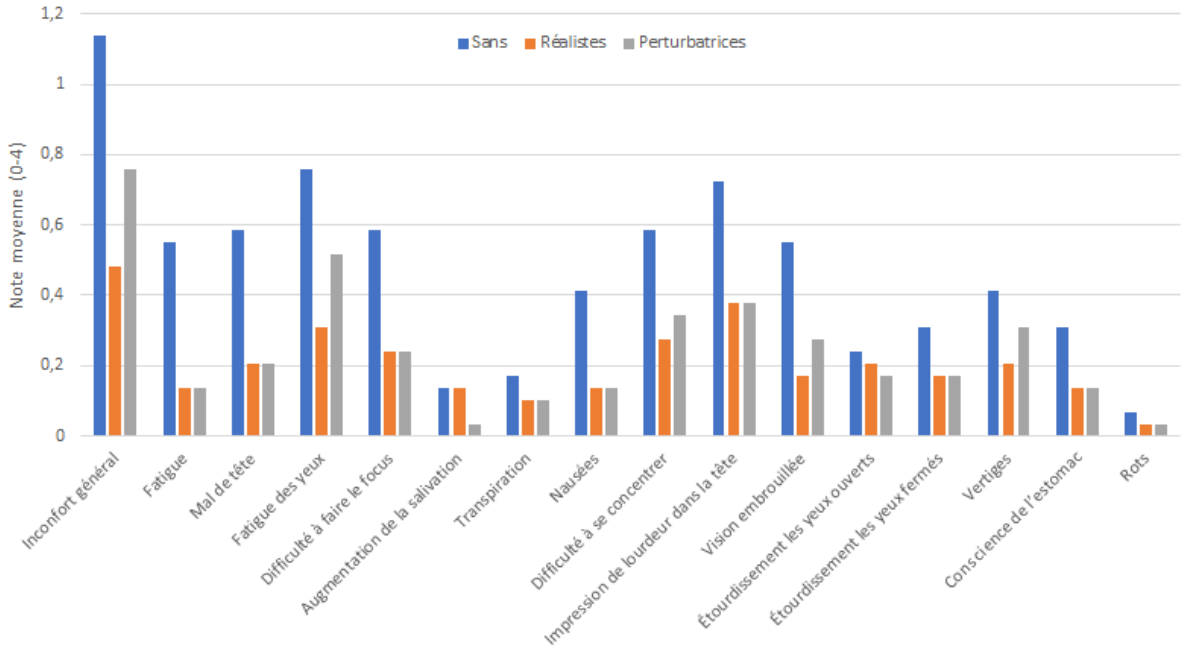


FIGURE 4.15 – Scores des symptômes de mal de simulateur

La figure 4.16 illustre les différents scores SSQ moyens par sous-échelles, ainsi que le score total en fonction de la configuration vibratoire choisie. Les barres d'erreurs représentent ici les écarts-types, en positif et négatif, qui, comme vu précédemment, sont assez grands. La sous-échelle la plus affectée est « Désorientation », suivie de « Oculomoteur » pouvant correspondre à l'effet du casque de réalité virtuelle.

Les résultats des comparaisons statistiques avec le test de Wilcoxcon sont consignés dans le tableau 4.3. Dans les deux cas de configurations vibratoires, nous avons observé un effet prophylactique significatif ($p \ll 10^{-3}$) des modalités vibratoires sur le mal du simulateur. Les vibrations réalistes réduisent, en effet, en moyenne de 57 % les symptômes de cinétoses contre 47 % pour les vibrations perturbatrices. On peut d'ailleurs observer une légère différence ($W = 37$) significative entre l'effet des deux modalités vibratoires en faveur de celle réaliste.

Nous pouvons observer (cf. figure 4.16) que les symptômes de la maladie sont également réduits dans les trois sous-échelles de la maladie du simulateur. La vibration n'affecte pas seulement les symptômes de désorientation (-53 % et -48 %), que nous pensions être ceux les plus corrigés. Elle affecte également les symptômes nauséeux (-54 % et -45 %) et oculomoteur (-61 % et -48 %).

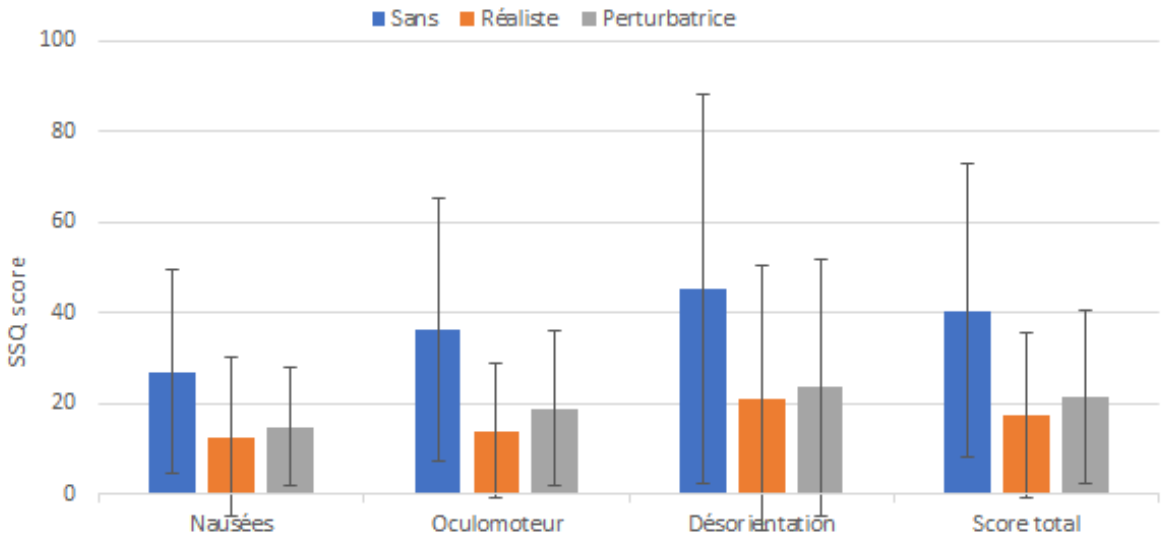


FIGURE 4.16 – Scores SSQ par sous-échelle

	Normal	Avec Correction	Réalistes/Perturbatrices
W	406	423	37
p	$1{,}94 \times 10^{-6}$	$4{,}39 \times 10^{-6}$	$5{,}76 \times 10^{-3}$

TABLE 4.3 – Résultats des tests de Wilcoxon pour les SSQ

4.5.2 Mesure posturale

Les mesures du balancement postural corroborent les résultats des mesures SSQ, à l'exception de la différence entre les deux configurations de vibrations. Comme précédemment, les données sont assez dispersées (cf. figure 4.17), pouvant aller jusqu'à une différence de 350 cm^2.

Par ailleurs, une amélioration dans le balancement postural de deux sujets a été observée dans cette configuration (n° 7 et 21). Cette observation se retrouve aussi pour d'autres sujets dans les autres configurations, d'autant plus que généralement ces sujets exprimaient verbalement être malades (inconfort, nausée, etc.) après la simulation. Cette observation semble contraire à la théorie d'instabilité posturale [STOFFREGEN et RICCIO 1991].

De même que pour les scores SSQ, les valeurs de mesures posturales ne peuvent être assimilées à une distribution normale. Cette hypothèse est vérifiée par les tests de normalité de Shapirow-Wilks ($p_{sans} = 0{,}0131$; $p_{réalistes} = 0{,}178$; $p_{perturbatrices} = 0{,}0363$). C'est pourquoi, pour la suite de l'analyse, nous allons aussi utiliser le test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés.

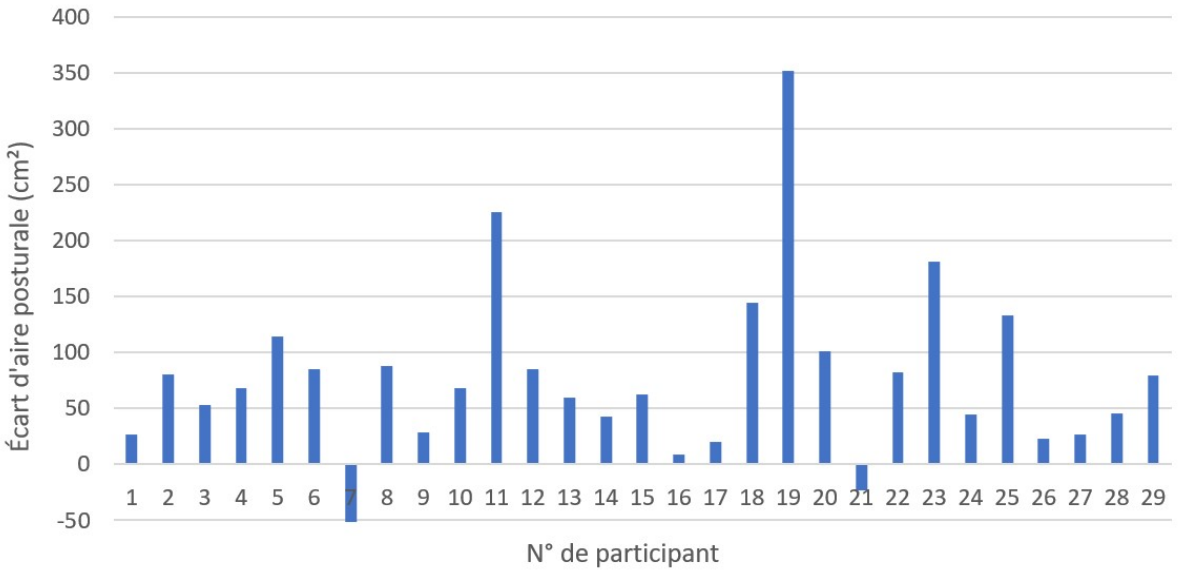


FIGURE 4.17 – Écarts d'aire du balancement postural pour la configuration sans vibrations

Comme pour les résultats des SSQ, les deux types de vibrations semblent avoir un effet prophylactique sur le mal du simulateur (cf. figure 4.18). Cette amélioration de l'écart d'instabilité posturale est en effet significative (cf. table 4.4), réduisant l'impact sur le balancement postural de 45 % pour les vibrations réalistes contre 35 % pour les vibrations perturbatrices. Néanmoins, aucune différence significative (cf. table 4.4) n'a été trouvée entre les deux configurations de vibrations.

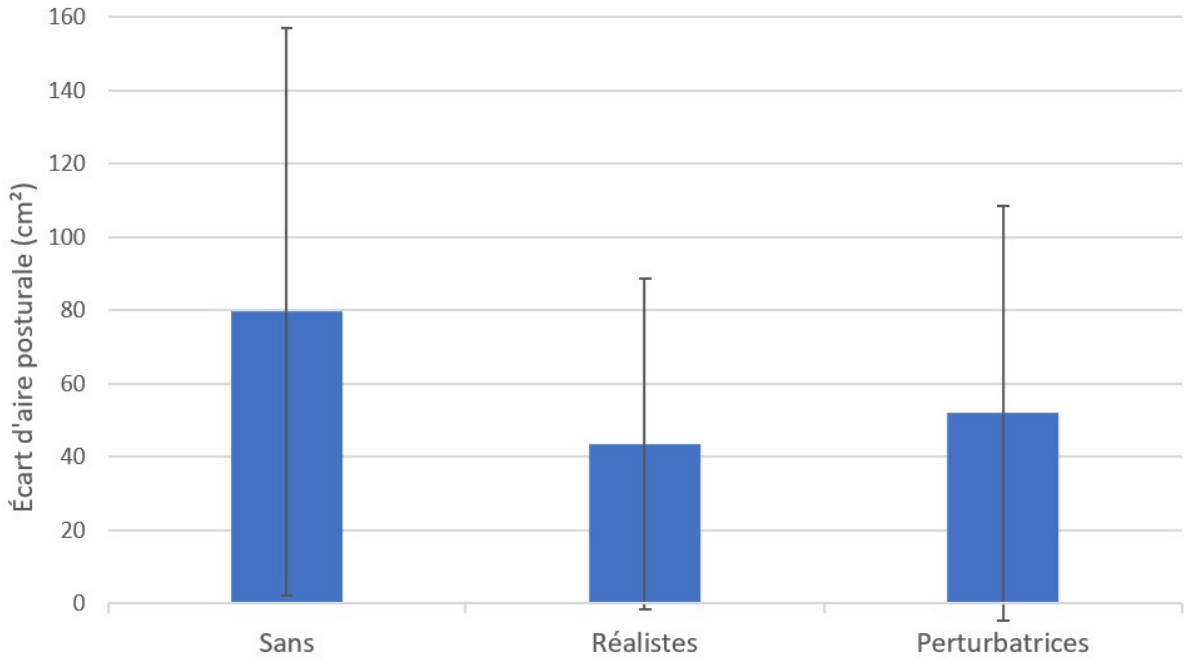


FIGURE 4.18 – Écart d'aire du balancement postural pour chaque configuration

	Sans/Réalistes	Sans/Perturbatrices	Réalistes/Perturbatrices
W	381	343,5	166
p	$8{,}72 \times 10^{-5}$	$3{,}33 \times 10^{-6}$	0,137

Table 4.4 – Résultats des tests de Wilcoxon pour les mesures d'aire posturale

L'analyse de la multifractalité du déplacement du balancement postural corrobore les précédents résultats. En effet, une réduction des écarts des spectres multifractaux peut être observée (cf. figure 4.19). Cette réduction dans la largeur des spectres est significative (cf. table 4.5), avec une réduction de 47 % pour les vibrations réalistes contre 33 % pour les vibrations perturbatrices. Cependant, aucun écart significatif ne peut être observé entre les deux types de vibrations.

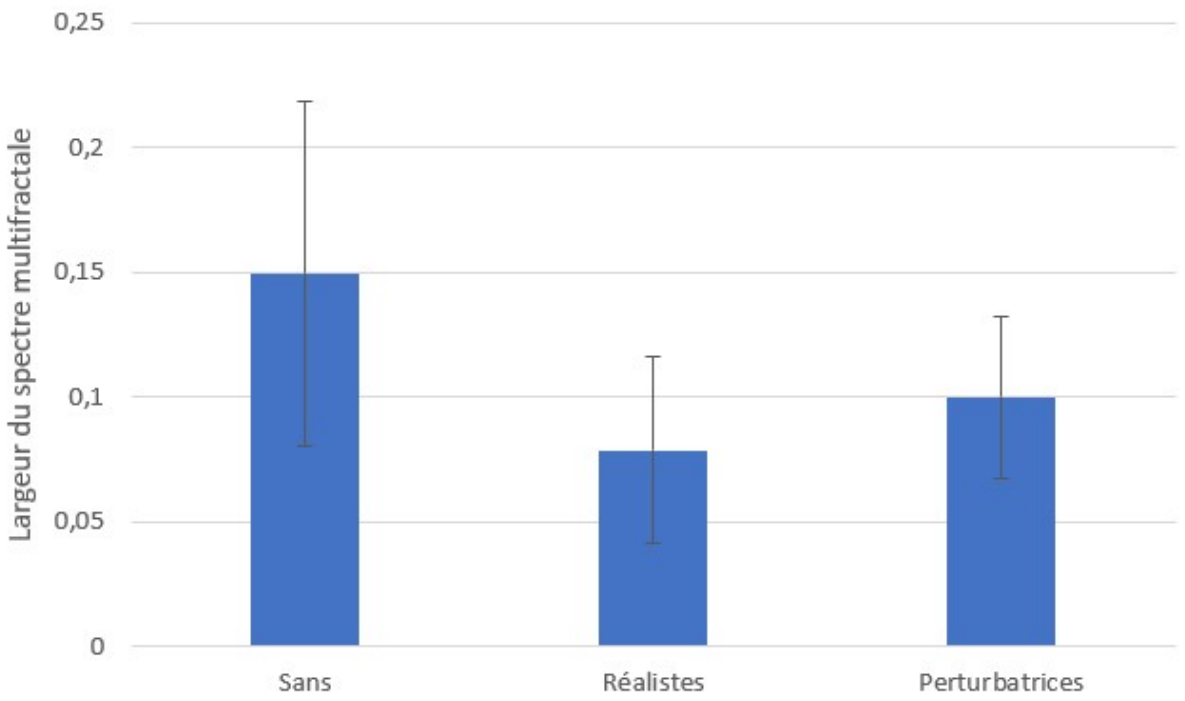


Figure 4.19 – Écart de largeur du spectre multifractal du balancement postural pour chaque configuration

	Sans/Réalistes	Sans/Perturbatrices	Réalistes/Perturbatrices
W	395	355	195
p	$9{,}523 \times 10^{-6}$	$4{,}55 \times 10^{-5}$	0,0735

Table 4.5 – Résultats des tests de Wilcoxon pour les mesures du spectre multifractal

4.5.3 Classement des configurations

À la fin de l'expérimentation, il a été demandé aux participants de classer les configurations par ordre de préférence en dehors des effets sur le mal du simulateur. Nous pouvons observer une nette préférence pour la configuration de vibrations réalistes (cf. table 4.6) avec des différences significatives avec les autres configurations (cf. table 4.7). Il ressort une préférence pour la configuration sans vibration par rapport aux vibrations perturbatrices qui peuvent être légèrement dérangeantes, cependant cet écart n'est pas significatif (cf. table 4.7).

	Réalistes	Sans	Perturbatrices
Moyenne	1,07	2,38	2,55
Écart-type	0,26	0,62	2,55

Table 4.6 – Moyenne du classement de préférence pour chaque configuration

	Réalistes/Sans	Réalistes/Perturbatrices	Sans/Perturbatrices
W	403,5	435	310
p	$1{,}4\times 10^{-5}$	6.1×10^{-7}	$2{,}3 \times 10^{-2}$

Table 4.7 – Résultats des tests de Wilcoxon pour le classement des configurations

4.6 Discussion

Le but de cette étude était de déterminer si certains types de vibrations du siège pouvaient aider à réduire le mal du simulateur. Trois configurations ont été comparées : pas de vibrations, des vibrations réalistes, et des vibrations perturbatrices. Nos résultats montrent que ces vibrations spécifiques du siège pourraient atténuer les symptômes du mal du simulateur, comme l'indiquent les réductions du score au SSQ ainsi que les mesures du balancement postural. Cependant, la différence entre la configuration des deux vibrations n'était pas véritablement significative, même si les vibrations réalistes montrent de meilleurs scores. Le reste de cette discussion approfondira ces résultats et ce en adoptant différents points de vue.

4.6.1 Effets des vibrations

Les résultats confirment nos hypothèses sur l'effet d'ajout de vibrations réalistes et cohérentes. En effet, en plus des résultats significatifs, les sujets ont souvent souligné leur préférence pour cette configuration, avec, de plus, un meilleur ressenti des vitesses et accélérations. Les vibrations ont ainsi complémenté la vection visuelle avec une perception kinesthésique du mouvement, à défaut du système vestibulaire, renforçant ainsi la sensation de mouvement et réduisant les conflits sensoriels.

Par ailleurs, les vibrations étant normalement présentes lors de la conduite, cette configuration est plus proche des schémas habituels de perception sensorielle, induisant donc moins de cinétoses. Cet effet s'est fait sentir en supprimant l'impression de « conduire une voiture volante » qui peut être assez dérangeante. Enfin, malgré l'absorption du corps, ces vibrations peuvent aussi atteindre le système vestibulaire et les tissus abdominaux (pouvant capter aussi les mouvements) et peut-être leur induire un signal de mouvement.

L'amélioration de la condition des conducteurs avec les vibrations réalistes pourrait aussi être liée à l'augmentation de la présence dans cette configuration [Prothero et D. E. Parker 2003]. En effet, les conducteurs ne percevraient alors moins la différence entre l'expérience et le réel, et distingueraient donc moins les défauts de la simulation.

Les vibrations perturbatrices se sont elles aussi montrées efficaces dans la réduction du mal du simulateur. En perturbant les sens proprioceptifs, ces vibrations réduisent les conflits sensoriels, remarqués par quelques participants notant que les accélérations et les virages les gênaient moins. En plus de jouer un rôle perturbateur, nous pensons que ces vibrations pourraient avoir un effet de masque sur les sens proprioceptifs et vestibulaires. Ceux-ci étant surchargés par les vibrations, peu de perception du vrai mouvement est possible, atténuant possiblement les conflits sensoriels. En effet, le mal des transports résulte de conflits entre les schémas sensoriels réels et attendus. Or, en simulation, les sens vestibulaires et proprioceptifs ne concordent pas forcément avec le sens visuel. Par conséquent, avec des vibrations perturbatrices, nous ajoutons du bruit sur ces sens non cohérents. Il en résulte que leurs signaux sont moins clairs par rapport au visuel, et il est

donc probable que les conducteurs aient tendance à fonder davantage leur perception sur le sens visuel, réduisant ainsi le conflit.

En effet, même si le corps fait office d'amortisseur, ici les participants sont assis. Ainsi, il n'y a que la partie haute de la colonne vertébrale qui va absorber les vibrations avant qu'elles n'atteignent la tête, absorption qui peut être outrepassée si le participant pose sa tête contre l'appui-tête. Ainsi, la réduction du mal du simulateur peut également être due à un effet similaire à celui observé par Bos [Bos, Jelte E. 2015]. Cette hypothèse peut aussi être valable pour les vibrations réalistes.

Dans la simulation de conduite sans plateforme de mouvement, les moments les plus dérangeants sont sans doute les accélérations et les virages [Kolasinski 1995]. Plusieurs rapports verbaux des participants appuient cette supposition, affirment leurs dérangements lors de ces passages dans les trois configurations. Cependant, les participants ont également affirmé qu'ils étaient davantage dérangés dans la configuration sans rendu de vibrations. Même si les vibrations réalistes peuvent apporter une perception du mouvement linéaire, elles ne rendent pas compte des accélérations de rotations ou latérales. Cela semble suggérer que des vibrations peuvent brouiller les signaux vestibulaires et qu'elles peuvent avoir servi de distraction mentale ou de masque sensoriel.

Comme nous l'avons vu, il n'y a pas de différence significative sur la mesure de l'instabilité posturale entre les deux configurations avec vibrations. Néanmoins, les participants ont trouvé la troisième configuration moins agréable, bien que cela ne soit pas significatif. Le scénario étant cependant assez court (≈ 5 min), cela pourrait expliquer pourquoi la différence n'était pas significative. Toutefois, avec une simulation plus longue, l'effet gênant des vibrations perturbatrices pourrait induire une sensation nettement moins confortable pour le conducteur.

4.6.2 Ouvertures

Une amélioration dans le balancement postural de plusieurs sujets a été observée dans cette étude. De plus, ces sujets exprimaient verbalement être malades, en plus d'un score non nul au SSQ. Ces mesures semblent remettent en question la théorie d'instabilité posturale, soutenant que l'instabilité posturale est à l'origine des cinétoses, ou alors qu'il y a un défaut dans la mesure.

Comme le montrent les résultats, les écarts dans les mesures d'instabilité posturale étaient moindres que pour les scores SSQ, en particulier entre les deux configurations de vibrations où il n'y a pas de différence significative. Cette différence pourrait être due à la position assise des participants lors de la simulation. En effet, dans cette position, le contrôle postural est plus limité et se retrouve limité au haut du corps, néanmoins maintenu par le dossier et la ceinture. Pour cette raison, l'adaptation du contrôle postural [Riccio et Stoffregen 1991] est réduite, conduisant sans doute à moins d'instabilité après la simulation lors de la mesure.

De plus, la stabilité posturale aurait pu être perturbée par le modèle de vibrations, non

pas uniquement par le mal du simulateur. En effet, afin de corriger le contrôle postural de personnes affectées par différents problèmes médicaux, de la rééducation avec vibrations du corps entier peut être utilisée [Bogaerts et al. 2007 ; Nes et al. 2004]. D'une part, cela peut, de ce fait, réduire l'importance de la mesure du balancement postural pour ce type d'expérimentation. D'autre part, ces études montrent une amélioration du balancement postural après exposition aux vibrations du corps entier. En se basant donc sur la théorie de Stoffregen et Smart [1998], des vibrations pourraient ainsi aider à réduire le mal des transports après la simulation.

Même si le taux de rafraichissement visuel était cadencé à 75 Hz, nous observons une certaine diminution du taux pendant la simulation ($\approx$ 50 Hz). Ce phénomène pourrait expliquer, entre autres, les hauts scores dans la sous-échelle de symptômes oculomoteurs des SSQ.

De nombreux participants ont, dans leurs retours, soulevé le problème des virages, qu'ils jugent assez dérangeants et cinétogènes. En effet, les vibrations réalistes donnent des indices sur la vitesse et les accélérations longitudinales, mais pas pour les accélérations transversales et de rotations qui sont principalement dues aux virages. Ainsi, pour des expérimentations futures, il peut être intéressant de travailler sur un rendu vibratoire spécifique aux virages en déplaçant les vibrations d'un côté ou de l'autre pendant les virages.

4.7 Conclusion

La présente étude a étudié les effets des vibrations du siège dans la simulation de conduite et plus particulièrement son rôle en tant que contre-mesure contre le mal du simulateur. Nos résultats ont montré que certaines configurations de vibrations spécifiques peuvent avoir un effet prophylactique sur le mal du simulateur. Cette étude confirme ainsi l'utilité des dispositifs reproduisant les vibrations de la route dans la simulation de conduite, non seulement pour l'immersion et lma présence du conducteur, mais aussi afin de réduire la survenue et la sévérité du mal du simulateur.

Une autre étude, parue récemment, cet effet prophylactique de l'ajout de vibrations réalistes et cohérentes pour la simulation de conduite [Sawada et al. 2020].

Les résultats de notre étude ont confirmé les besoins de systèmes de vibrations pour les futurs simulateurs de Renault, notamment ROADS dont les cabines véhicules seront équipées d'un système de vibrations.

Cette étude a d'ailleurs été présentée lors de la conférence DSC (Driving Simulation Conférence) 2018 et a ensuite donné lieu à une publication dans la revue TRF (Transportation Research Part F) 2019, DOI : 10.1016/j.trf.2019.11.011. (cf. annexe p. VII)

Une suite à cette étude aurait dû être faite chez Renault sur le nouveau simulateur HELIOS, équipé de vérins D-BOX©, afin de valider les résultats sur un autre simulateur et de tester des vibrations dans les virages, comme suggéré ci-dessus. Cependant, des problèmes techniques ainsi que l'indisponibilité du simulateur en faveur des besoins des métiers Renault, ont empêché le déroulement de cette étude nous poussant à travailler sur d'autres pistes.

CHAPITRE 5

ÉTUDE : CORRECTION DE L'ÉCART DE LATENCE

Le simulateur Helios n'étant pas disponible pour tester d'autres configurations de vibrations, nous nous sommes orientés vers un autre sujet d'étude : la correction de l'écart de latence.

En effet, sur le simulateur Ultimate, plusieurs retours verbaux soulignaient que la route semblait bouger ou flotter lors de accélérations ou de décélérations. L'une des causes possibles que nous avons identifiées était un écart temporel entre les retours visuel et physique (mouvement). Cela nous amené à mesurer les latences du simulateur afin d'essayer de les corriger. Comme nous l'avons vu précédemment, cet écart temporel peut être la source de conflits sensoriels et par conséquent de cinétoses.

5.1 Simulation de conduite et latences

La latence est une caractéristique fondamentale qui se retrouve dans la plupart des systèmes, celle-ci peut cependant avoir des effets critiques dans certaines situations.

5.1.1 Latences des simulateurs

La latence peut être définie par le retard entre l'action d'un utilisateur et sa prise en compte par le système, voire même jusqu'à son retour (feedback) à l'utilisateur, comme dans le cas de la simulation. Cette caractéristique a beaucoup été étudiée par les opérateurs et les constructeurs afin de la maintenir la faible possible possible dans leurs systèmes.

Il existe différents types de latences qui peuvent être classées comme suit [Jacobs et al. 1997] :

1. Délai de transport : durée que prend l'information pour transiter d'un système à un autre.
2. Délai de calcul : temps écoulé pendant que le système traite et transforme les données. Par exemple, le calcul du rendu visuel ou l'algorithme de contrôle de la plateforme de mouvement
3. Délai système : temps écoulé entre l'arrivée du signal dans le système et sa retransmission. Par exemple, le délai d'un système d'affichage.
4. Délai de synchronisation : temps entre les étapes pendant lequel les données sont stockées sans être traitées.

Ces différents types de latences se retrouvent tout au long de la chaine de simulation et pour l'ensemble des systèmes. Depuis l'action de l'utilisateur jusqu'à son retour par le système, ces latences vont donc se cumuler et peuvent avoir des effets indésirables. C'est pourquoi chaque type de latence doit être maintenu aussi bas que possible. Cela peut être réalisé par des architectures logicielles efficaces, mais aussi par une sélection de matériels à hautes performances, ainsi que leurs bons réglages.

Dans le cas de la simulation de conduite, trois latences globales peuvent définir le niveau de performance du simulateur (cf. figure5.1) : la latence de mouvement, la latence visuelle et l'écart de latence entre le mouvement et le visuel. Ces latences sont mesurées entre l'activation du volant et la réponse du simulateur (visuelle ou dynamique). Ces systèmes présentent des retards en fonction de leur puissance mécanique, de leur masse, de leur design, des cartes graphiques, des projecteurs, etc.

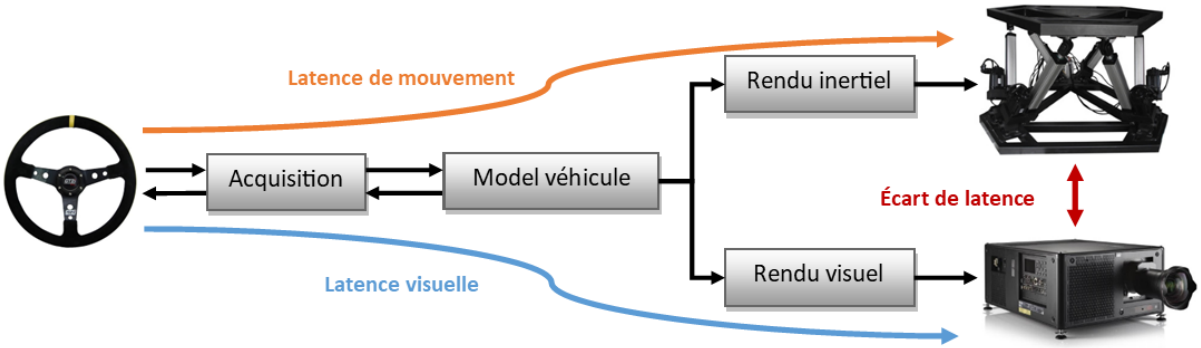


Figure 5.1 – Latences importantes d'un simulateur de conduite

5.1.2 Perception de la latence

La perception de la latence se fait de manière indirecte [Adelstein et al. 2003]. En effet, elle ne serait pas perçue directement pas les systèmes sensoriels, mais par son effet

sur l'environnement. Dans le cas de la simulation immersive, cela se manifeste par des oscillopsies [Allison et al. 2001], c'est-à-dire que l'environnement semble bouger, flotter dans l'espace. Plus l'environnement est immersif, plus le ressenti de la latence peut être fort. Cependant, sa perception est indépendante de la complexité de la scène [Mania et al. 2004] : elle est la même dans un décor minimaliste ou surchargé. Dernièrement, la latence ne suivrait pas la loi de Weber-Fechner, c'est-à-dire que la sensation mentale n'est pas proportionnelle à la grandeur physique du stimulus. La même variation de latence serait donc perçue, quelle que soit la valeur initiale de celle-ci [Adelstein et al. 2003].

Le seuil de perception de la latence visuelle a été mesuré à hauteur d'un intervalle de 15 à 18,6 ms [Regan et al. 1999]. Néanmoins, ces valeurs ont été observées dans le cadre d'un environnement souvent non-immersif, pouvant avoir une forte influence sur le résultat. De même, les résultats peuvent fortement varier suivant la tâche demandée pendant l'expérimentation : être concentré sur la perception de la latence ou sur une autre activité. Par ailleurs, dans le cas de la simulation de vol, sans concentration sur la latence elle-même, le seuil est plutôt estimé aux alentours de 50 à 100 ms.

Le seuil de perception du mouvement est plus élevé et moins gênant avec une valeur en simulateur de vol aux alentours de 170 ms [Frank et al. 1988]. Cependant, cette latence est plus facilement perceptible lorsque l'écart avec le visuel est plus important.

5.1.3 Effets de la latence

La latence peut avoir une forte influence sur la performance [Meehan et al. 2003 ; Papadakis et al. 2011], et il a été démontré que la performance varie de manière inverse par rapport à la latence : plus cette dernière augmente, plus la performance en est affectée.

En plus de son effet sur la performance, la latence est aussi connue pour avoir une influence sur le mal du simulateur [K. E. Money 1970 ; Pausch et al. 1992 ; Kolasinski 1995 ; Perroud et al. 2018]. Cet impact est particulièrement visible sur l'écart de latence entre le mouvement et le visuel, créant un asynchronisme entre la vision et le mouvement chez l'utilisateur. Ceci est considéré comme étant la latence la plus importante impliquée dans le mal du simulateur, et elle doit par conséquent être maintenue aussi basse que possible.

Ainsi, un asynchronisme des stimulus visuels et vestibulaires, au-delà de 30-50 ms en fonction du simulateur et de la tâche, est susceptible d'entrainer un conflit supplémentaire entre les systèmes visuels et vestibulaires, pouvant induire le mal du simulateur [Frank et al. 1988 ; Kemeny 2000 ; Pausch et al. 1992 ; M. H. Draper 1996]. En effet, ce délai aurait pour conséquence de créer un conflit supplémentaire entre les systèmes visuels et vestibulaires.

Dans le cas de casques de réalité virtuelle, les délais visuels ont un risque accru d'induire des cinétoses car le système visio-vestibulaire prend plus de temps pour stabiliser une image rétinienne. Un mouvement détecté dans la scène est perçu comme un glissement de l'image alors que les systèmes vestibulaires et proprioceptifs indiquent une stabilité de

la tête. La détection de ce glissement d'image peut affecter les fonctions compensatrices, telles que les réflexes optocinétiques et vestibulo-oculaire ou l'accommodation visuelle, qui peuvent détecter des changements en moins de 20 ms [M. H. Draper 1996].

5.1.4 Hypothèse de l'étude

Le simulateur Ultimate ayant été conçu au début des années 2000, nous supposons qu'il possède une latence de mouvement non négligeable. En effet, le système de mouvement à une latence qui dépend de sa puissance mécanique, de sa masse, de son design, de l'algorithme de contrôle, etc. C'est également le cas du système visuel, en fonction des cartes graphiques et des projecteurs, etc. C'est pourquoi nous allons, dans un premier temps, mesurer ces latences de fonctionnement.

La différence entre ces deux latences crée un asynchronisme qui est connu pour être à l'origine du mal du simulateur en raison de stimulations sensorielles non cohérentes. C'est pourquoi, dans un deuxième temps, nous allons nous pencher sur une possible correction de cet écart de latence.

Nous formulons l'hypothèse que l'ajout d'un retard pur sur le visuel, afin de se synchroniser sur le retard mécanique, augmenterait la cohérence du mouvement et réduirait ainsi le mal du simulateur.

5.2 Mesures des latences

La mesure précise des latences des simulateurs est souvent un problème délicat en raison de la complexité technique des systèmes et de leurs imbrications. Le principe de mesure des latences globales du simulateur repose sur une instrumentation extérieure, capable de détecter et d'enregistrer les différentes sollicitations et réactions du simulateur. L'enregistrement de ces évènements doit se faire avec une horloge de référence externe afin de permettre la mesure des différents décalages temporels entre les entrées et les sorties du simulateur.

5.2.1 Mesure de la latence de mouvement

La mesure de la latence du système de mouvement sur le simulateur de conduite Renault Ultimate avait déjà été réalisée dans une précédente étude [Fang, Reymond et al. 2011], facilitant notre mesure.

La latence apparente d'un système d'actionneurs commandés par ordinateur est généralement composée de deux termes : un retard pur et un retard de phase.

Le retard pur correspond au temps mis par le système informatique pour transférer une information d'entrée en une commande pour le système d'actionneur. Le temps de calcul, la mise en mémoire tampon des données et des filtres numériques impliqués dans les différents algorithmes du simulateur peuvent créer des retards importants. Dans une architecture multiprocessus typique, les différents temps de cycles et les protocoles de communication entre processus peuvent également participer à ce retard. Selon le système d'exploitation, ce délai peut être variable (système d'exploitation préemptif) ou fixe (système d'exploitation en temps réel). Dans la plupart des simulateurs, le chemin de données suivi par une entrée de pilote est complexe et implique plusieurs sous-systèmes, dont les performances sont souvent indépendantes du contrôle du concepteur du simulateur : l'acquisition de données (matériel de numérisation, pilotes), les protocoles de communication (par exemple : USB, mémoire réflective, TCP/IP, mémoire partagée, etc.), l'ordonnanceur du système d'exploitation, etc. Sans l'aide de mesures externes, tous ces facteurs rendent difficile l'identification du retard résultant.

Le retard de phase correspond au temps de réponse du système d'actionneurs de mouvement. Il dépend de la technologie employée pour les contrôleurs de mouvement (fréquence et paramètres de la boucle de commande) et pour les actionneurs eux-mêmes (charge, puissance et amortissement). Dans le cas des moteurs électriques, l'électronique et les bobines se comportent généralement comme des filtres passe-bas. Pour les actionneurs hydrauliques, la charge et l'amortissement interne de l'actionneur créent également un comportement passe-bas. Ces systèmes sont généralement conçus pour avoir une réponse linéaire globale, et comme pour tout système linéaire, le retard de phase dépendra de la fréquence du signal d'entrée et des paramètres du système.

Ces différents retards ont été mesurés grâce au logiciel Spymove, spécifiquement développé pour cette fonction avec une centrale inertielle. Ce logiciel permet la synchronisation du signal envoyé et du signal mesuré par la centrale (cf. figure 5.2). Les résultats (résumés ci-dessous : table 5.1) ont été mesurés à 0,2 Hz et montrent un retard d'environ 220 ms. La fréquence moyenne d'utilisation du simulateur est de 0,2 Hz, mais ce délai peut légèrement varier en fonction de la fréquence d'utilisation. Nous pouvons observer que le délai de phase est beaucoup plus faible pour l'hexapode. Cependant, ces différences de délai sont déjà prises en compte dans l'algorithme de contrôle MCA (motion cueing algorithm) afin de générer des mouvements de plateforme cohérents.

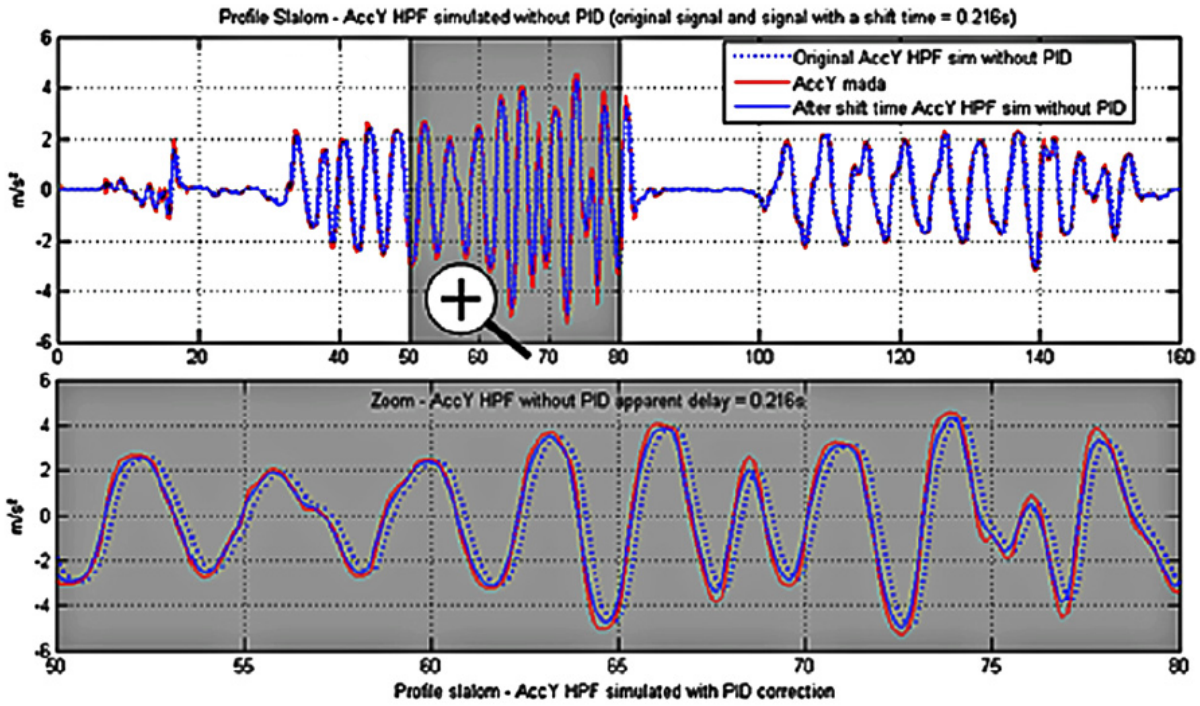


FIGURE 5.2 – Mesure des signaux de mouvements

	Délai pur (ms)	Retard de phase (ms)
Hexapode	30-35	35
Rails	15-20	200

TABLE 5.1 – Tableau des latences de mouvement Ultimate

5.2.2 Mesure de la latence visuelle

Le retard visuel du simulateur Ultimate a été mesuré grâce à un outil spécifique, le kit Unitest transport delay, développé par AVSimulation. Ce kit est utilisé afin de mesurer les différents retards de leurs simulateurs de conduite dynamique fonctionnant avec le logiciel [Saidi et al. 2010] SCANeR™ Studio. Il est composé de différents capteurs à déployer sur le simulateur (exemple pour le visuel cf. figure 5.3) :

- Une carte d'acquisition NI ENET-9205.
- Une carte de conditionnement des capteurs afin de les interconnecter à l'acquisition.
- Un accéléromètre à fixer pour la durée de la mesure sur le volant via une bande velcro.
- Un accéléromètre à placer sur la plateforme (Non utilisé dans notre cas).
- Une photodiode à placer dans le champ des vidéos-projecteurs.
- De plus, les voies 0 et 1 du port parallèle de l'ordinateur, faisant fonctionner le modèle dynamique, sont aussi mesurées afin de pouvoir y détecter certains évènements internes signalés par le modèle.

Le recueil des données se fait via un dispositif d'acquisition sur ethernet (NI ENET-9205). Ce dispositif est embarqué sur la plateforme mobile au plus près des capteurs afin de minimiser le bruit de mesure. Les données, une fois numérisées et datées par le boitier, sont acheminées par ethernet sans contrainte de distance jusqu'à un PC équipé du logiciel de mesure des latences avec une interface visuelle.

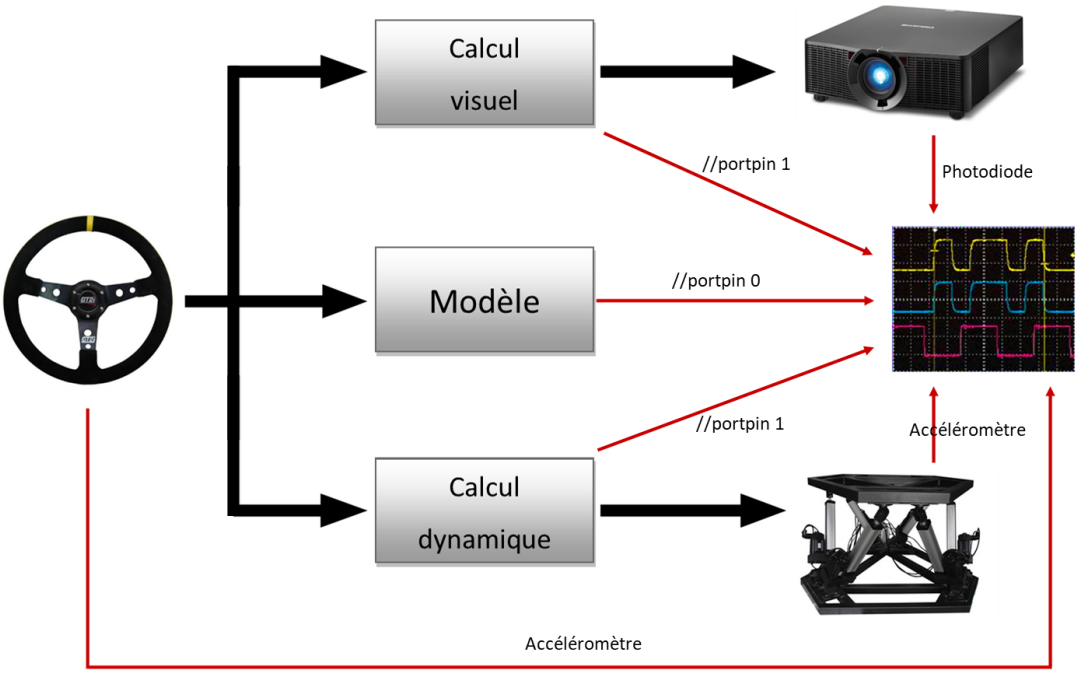


Figure 5.3 – Configuration des capteurs et de la chaine d'acquisition

Dans notre configuration, la mesure de latence de la plateforme ayant déjà fait l'objet d'une mesure plus complète, nous nous sommes passés de l'installation de l'accéléromètre. Celui-ci étant le capteur le plus compliqué à installer pour cette mesure, il s'avère que cela a grandement simplifié le processus par la même occasion.

Afin de faire fonctionner le module, il est nécessaire de charger un scénario spécifique contenant un modèle dynamique dédié. C'est un modèle « vide », son temps de calcul sera donc considéré négligeable, permettant ainsi d'exclure de la mesure la latence réelle d'un véhicule. Ce scénario comprend deux zones où peut aller le véhicule : une sombre et une claire. Le scénario de mesure se déroule alors comme suit :

1. Le modèle dynamique envoie périodiquement un couple au volant et signale cet envoi sur la ligne 0 du port parallèle.
2. Le modèle dynamique détecte la vitesse de rotation du volant (induite par le couple précédemment envoyé) et le signale sur la ligne 1 du port parallèle..
3. Le véhicule est alors téléporté dans l'autre zone de la base de données (claire ou sombre).
   - (Une accélération est aussi envoyée au module de mouvement.)
4. Le changement d'environnement crée ainsi un brusque saut de luminosité qui sera détecté par la photodiode.
   - (L'accélération est détectée par l'accéléromètre sur la plateforme.)

La carte de mesure va recevoir et synchroniser ces signaux pour mesurer les différentes latences (cf. figure 5.4). Le test se répète automatiquement à une fréquence déterminée et les différentes latences sont automatiquement calculées par l'outil et archivées.

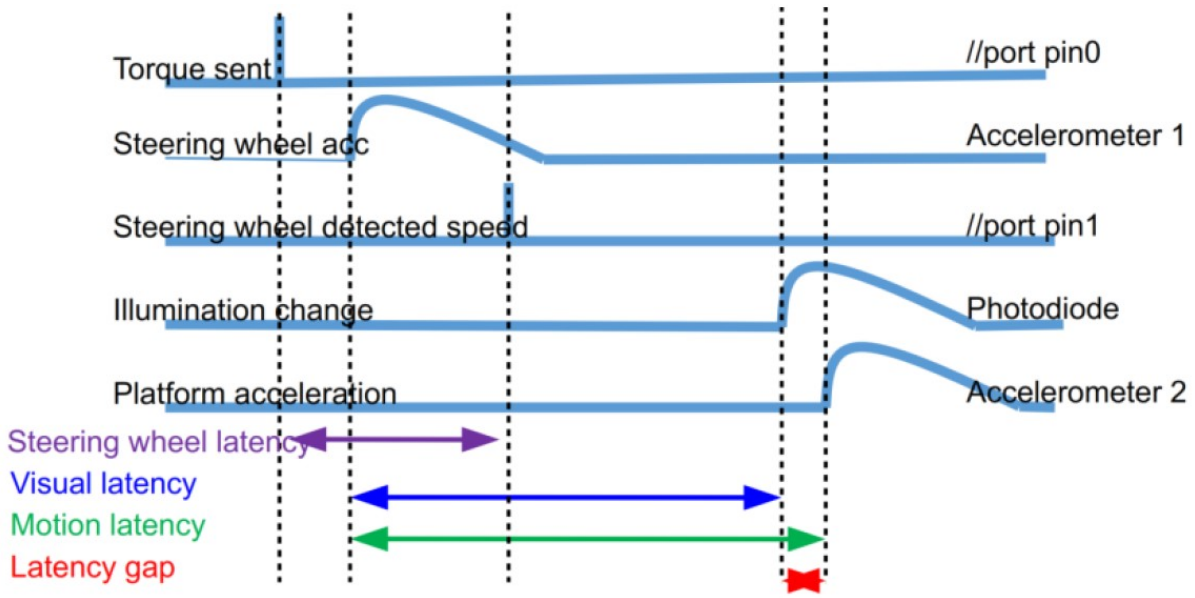


FIGURE 5.4 – Représentation des signaux reçus par la carte d'acquisition

Nous pouvons observer ci-dessous les signaux mesurés (cf. figure 5.5). La latence a été estimée sur 25 mesures consécutives et montre une moyenne d'environ 73 ms pour le système visuel (cf. table 5.2).

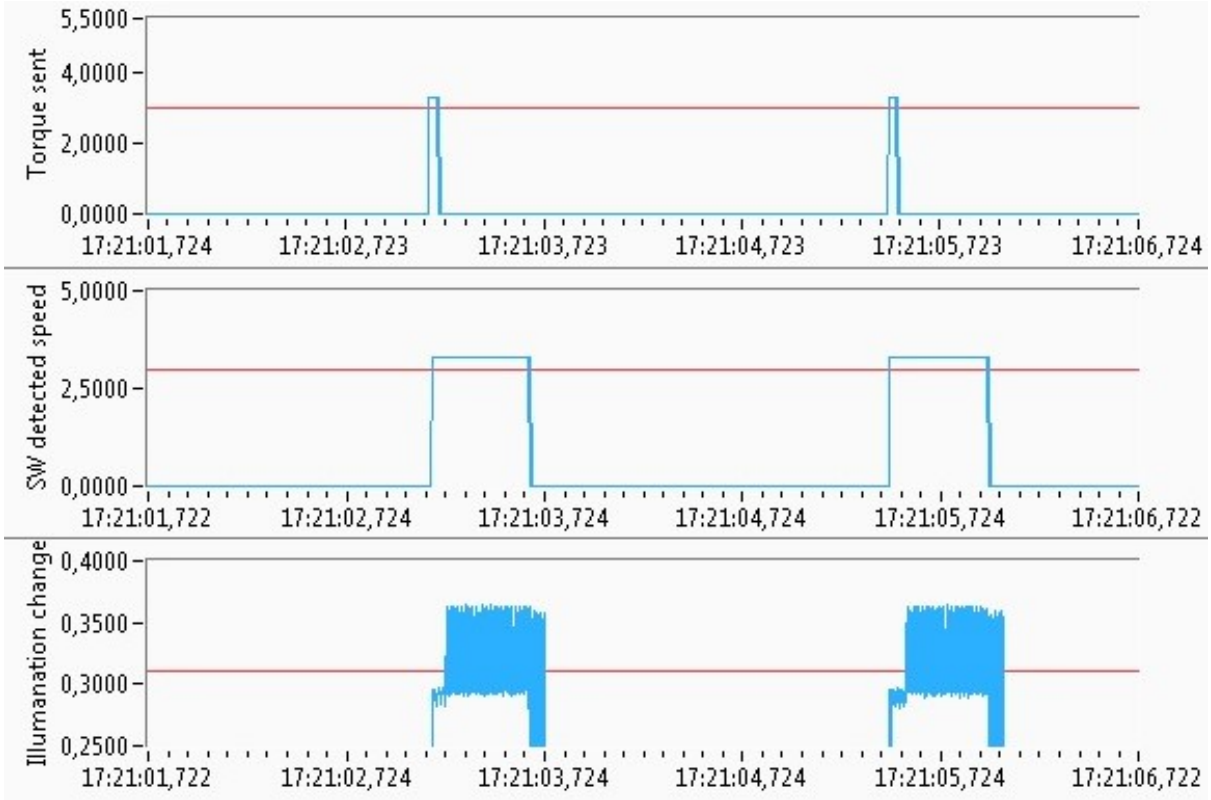


FIGURE 5.5 – Mesure de la latence visuelle d'Ultimate

	Latence visuelle (ms)
Moyenne	73,16
Écart-type	5,28

TABLE 5.2 – Résultat de la mesure de la latence visuelle d'Ultimate

5.3 Analyse de la correction de l'écart de latence

Maintenant que les mesures des latences visuelles et de mouvement ont été réalisées, il est possible de quantifier l'asynchronisme entre les deux signaux. Le simulateur Ultimate possède un écart de latence d'environ 147 ms du mouvement par rapport au visuel. Cet écart, étant assez important, est source d'asynchronisme des signaux visio-vestibulaires pour les conducteurs, qui seront plus enclins à développer des symptômes de mal de simulateur. Dans cette partie, nous allons étudier une possible correction de cet asynchronisme.

5.3.1 Protocole expérimental

Comme nous venons de le voir, le simulateur Ultimate possède un retard du mouvement sur le visuel d'environ 147 ms, augmentant ainsi l'incidence du mal du simulateur. C'est pourquoi, afin de contourner ce problème, nous avons pensé à retarder les signaux visuels afin de les rendre plus cohérents avec les mouvements du simulateur.

En retardant, les signaux visuels de 147 ms, nous réduisons les asynchronismes visio-vestibulaires. Cependant, le véhicule simulé se retrouve avec une latence globale d'environ 220 ms. Néanmoins, lors de simulations de conduite autonome, le pilote n'ayant pas le contrôle sur le véhicule, cette latence globale lui est invisible. Le pilote passif reçoit alors une stimulation visio-vestibulaire plus cohérente pouvant ainsi réduire l'incidence de mal du simulateur.

Nous avons donc décidé de tester cette solution et de mesurer son incidence sur le mal du simulateur, ainsi que sur le confort et le ressenti pour les conducteurs. Cette expérimentation s'est déroulée chez Renault, chaque participant devait conduire avec et sans la correction afin de pouvoir observer une différence, limitant ainsi les différences interpersonnelles. Les participants n'étaient pas informés des différentes configurations, mais savaient que c'était en rapport avec les algorithmes de contrôle du simulateur afin qu'ils puissent y prêter attention lors de la conduite. L'ordre de passage était bien sûr aléatoire afin de limiter un effet d'ordre et d'habituation. Les deux sessions de conduite étaient espacées au minimum de 18h afin d'éviter l'accumulation des symptômes du mal du simulateur.

5.3.2 Correction de la latence

Afin de retarder les signaux visuels, nous avons développé un module avec Matlab Simulink. Ce composant vient s'interfacer à la sortie du modèle de dynamique véhicule

virtuel (cf. figure 5.6), s'exécutant aussi sur la cible temps réel. Ce module récupère les signaux de sortie de MADA et les retransmet au simulateur, tout en ajoutant un retard pur sur les signaux visuels. Ce module est paramétré par un fichier de configuration permettant l'activation ou non du retard visuel, ainsi que le temps du retard à appliquer.

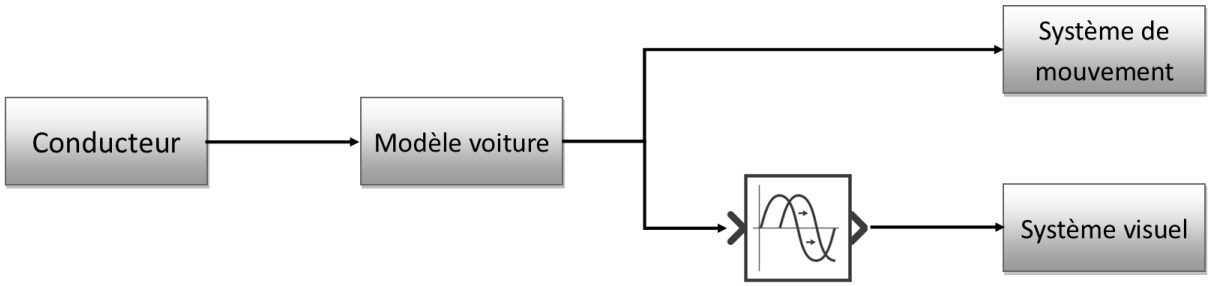


FIGURE 5.6 – Schéma d'implantation du module

5.3.3 Scénario de conduite

Le scénario de conduite a été développé dans SCANeR™ Studio 1.8. Les sujets étaient placés dans une voiture Renault Espace, en mode autonome, sur une modélisation de l'autoroute N104 à 110 km/h (cf. figure 5.7). Lors du déroulement du scénario, plusieurs situations se produisaient afin d'amener le véhicule à bouger, accélérer freiner, etc. Il s'agissait notamment de contextes avec des travaux sur la route, l'insertion d'un véhicule, rabattement dangereux, etc. L'objectif était de créer des situations de stimulation visio-vestibulaire où l'utilité de la correction pourrait se faire sentir. Ce scénario durait un peu plus de 10 minutes pendant lesquelles les sujets étaient assis derrière le volant et invités à regarder autour d'eux, à porter leur attention sur ce qui se passe sur la route et sur leurs ressentis.

FIGURE 5.7 – Aperçu de scénario de conduite

5.3.4 Mesures

Comme pour l'étude précédente, les sujets étaient amenés, en premier lieu, à remplir anonymement un questionnaire afin d'évaluer la population testée ainsi que leur propension au mal du simulateur (cf. annexe p. XVI). Puis, à la fin de l'expérience, ils étaient invités à remplir ce même questionnaire afin de connaitre leurs préférences subjectives entre les deux configurations ainsi que les différences perçues et autres remarques. Celui-ci était ensuite complété par un moment d'échange afin de répondre aux questions des sujets et d'obtenir d'autres remarques.

Le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) étant l'un des moyens de mesure des symptômes de mal du simulateur le plus répandu et accepté, les sujets ont rempli le SSQ en version traduite (cf. annexe p. XVIII) avant et après chaque passage, à l'instar de l'étude précédente. Ainsi, nous avons pu évaluer l'évolution des symptômes de cinétoses causés par chaque configuration en simulation. Cependant, ne pouvant disposer de la balance de mesure posturale, nous avons pu nous baser sur cette mesure uniquement pour estimer les cinétoses engendrées.

En plus de ces précédents questionnaires, à la fin de chaque séance, les sujets étaient amenés à remplir un questionnaire (cf. annexe p. 7.2) sur leur ressenti de la séance de conduite : comment ils percevaient le mouvement de la scène, vivaient leur immersion, les sensations de déplacement, s'ils percevaient un écart de mouvement/visuel, etc.

5.3.5 Participants

Les participants de l'étude étaient des volontaires travaillant chez Renault. Nous avons pu faire passer vingt-cinq personnes pour cette étude (cf. figure 5.3), dont vingt hommes et cinq femmes. Les sujets étaient âgés de 20 à 55 ans, avec une moyenne à 34 ans et un écart type de 9,9 ans. Tous les participants étaient en possession d'un permis de conduire valide, avec diverses expériences de conduite. La plupart étaient des conducteurs assez réguliers, faisant des trajets journaliers pour se rendre sur leur lieu de travail. Cependant, les sujets étaient peu sensibles au mal des transports, peu habitués aux jeux vidéos ainsi qu'à la simulation de conduite(ou la réalité virtuelle de façon de plus générale).

	Âge (ans)	Nombres d'années de permis	Conduis tous les jours (0-4)	Sensible au mal des transports (0-4)	Joueur de jeux-vidéos (0-4)	Habitué aux simulations (0-4)
Moyenne	34	14,7	3,08	0,42	1,35	1,48
Écart-type	9,88	8,90	1,32	0,83	1,39	1,35

Table 5.3 – Statistique de la population testée

5.4 Résultats

Nous allons présenter ici les résultats de cette étude. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées grâce au logiciel open-source R Project. Notons qu'une participante n'a pas pu faire la deuxième conduite pour des raisons externes, par conséquent le résultat incomplet n'a pas été pris en compte dans le reste de l'étude.

5.4.1 Simulator Sickness Questionnaire

Les participants ont réagi très différemment aux scénarios de conduite, les résultats sont donc assez dispersés (cf. figure 5.8) avec des écarts-types plus grands que les moyennes. Certains ont été peu affectés par la simulation (score proche de 0), alors que d'autres ont été réellement touchés et sont devenus assez nauséeux, surtout sans les vibrations (score jusqu'à 135). Cela implique également que la population ne peut pas être assimilée à une distribution normale, cela est confirmé par une non-validité des tests de normalité de Shapiro-Wilk ($p_{normal} = 1{,}68 \times 10^{-4}$; $p_{corrigé} = 5.0 \times 10^{-4}$).

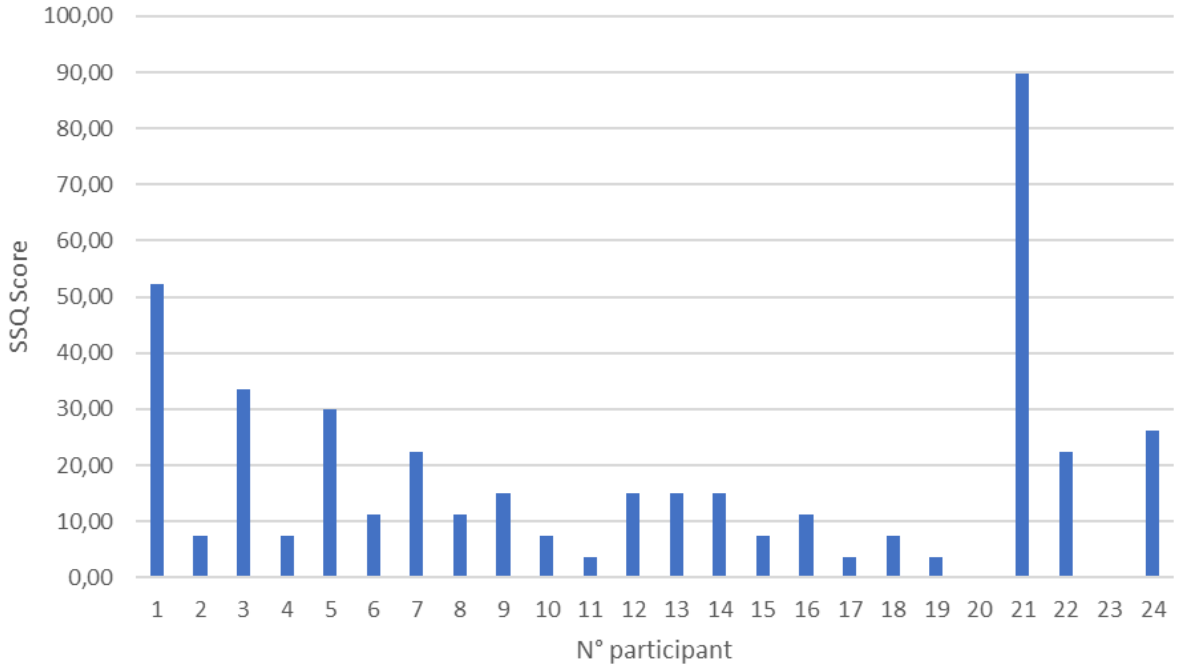


FIGURE 5.8 – Scores SSQ pour la conduite sans correction

Pour la suite de l'analyse, nous avons utilisé le test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés. Comme précédemment, nous avons utilisé un test non paramétrique afin de comparer les deux résultats car les échantillons ne peuvent pas être assimilés à une distribution normale.

La figure 5.9 illustre les différents scores SSQ moyens, avec leurs écart type, pour

chaque sous-échelles, ainsi que le score total, en fonction de la configuration. Nous pouvons déjà observé une nette amélioration dans les symptômes de mal du simulateur grâce à la correction. Les symptômes sont réduits dans les trois sous-échelles du mal du simulateur, et ce avec une réduction globale de 40 %. Les résultats de la comparaison statistique avec le test de Wilcoxcon confirment cet effet prophylactique significatif ($p = 4{,}1 \times 10^{-3}$) de la correction sur le mal du simulateur.

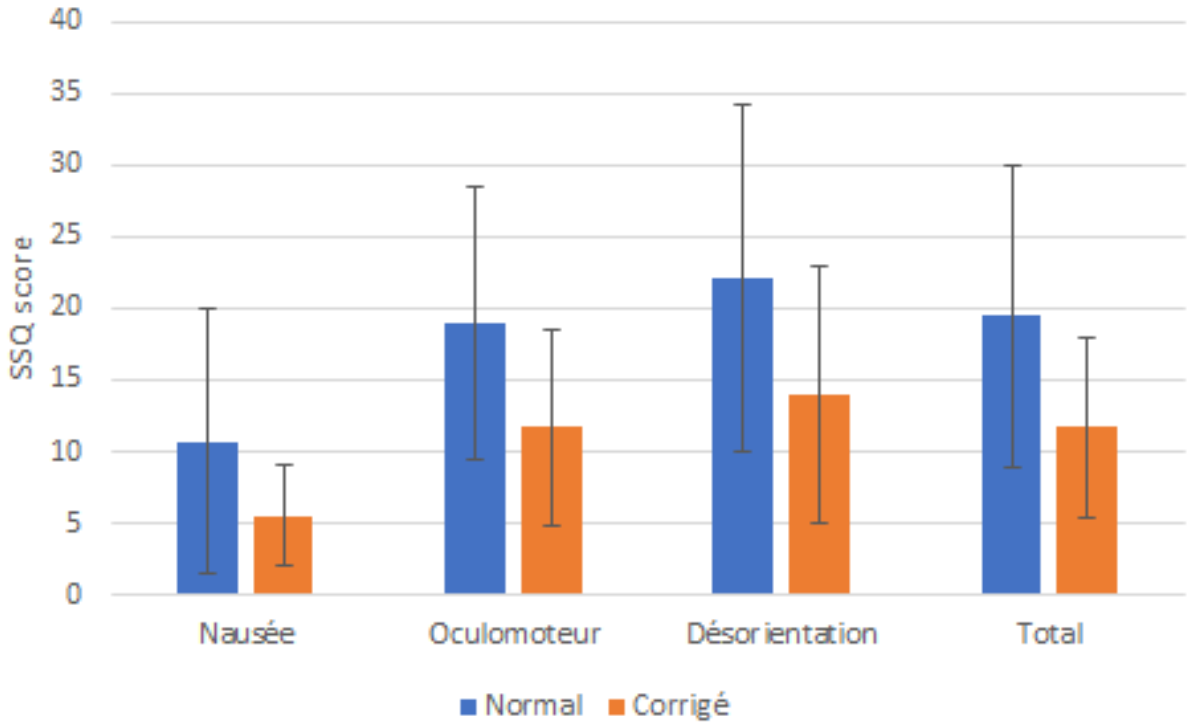


FIGURE 5.9 – Scores SSQ par sous-échelle

5.4.2 Questionnaires et commentaires

Dans le questionnaire final, il a été demandé aux participants de noter leur configuration de prédilection, corrigée ou non, sans connaitre la différence entre les deux configurations, et qui, de plus, avaient été passées dans un ordre aléatoire entre les sujets. Un quart des sujets n'a pas perçu de différence, et presque 60 % ont préféré la configuration corrigée qu'importe son ordre.

Pour les 17 % des sujets qui ont préféré la configuration non-corrigée, nous relevons que ce choix est dans tous les cas la deuxième configuration passée. Cela peut s'expliquer par un effet d'habituation au simulateur, la deuxième configuration passée paraissant plus agréable car le participant est habitué et a donc moins d'appréhension. Cet effet est d'ailleurs observable sur l'ensemble car dans 67 % des cas, la configuration préférée est la deuxième passée.

La configuration corrigée a, dans la plupart des cas et pour quasiment tous ceux qui l'ont préférée, été qualifiée de « conduite plus souple », « plus fluide », « moins brusque »,

« moins agressive », sans pour autant arriver à en identifier l'origine. Toutefois, un participant a relevé « une impression de décalage physique et visuel ».

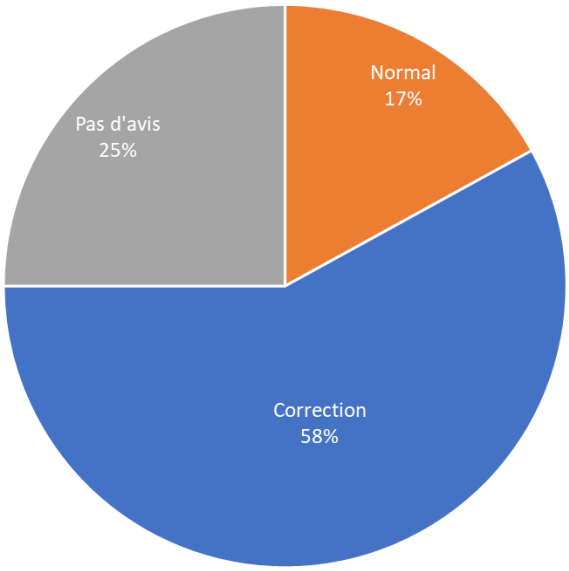


FIGURE 5.10 – Préférences de configuration des sujets

Les résultats des questionnaires sur l'étude des sensations lors de l'expérience de conduite simulée n'ont montré que peu de différences entre les deux configurations. Les résultats des questionnaires ainsi que les tests sont résumés ci-dessous dans le tableau 5.4. Une légère amélioration dans la perception du mouvement est notable, ainsi qu'une légère réduction de l'inconfort. Cependant, ces changements sont moindres et ne présentent pas de différence significative.

	Réalisme du mouvement	Similitude au réel	Sensation de mouvement	Implication dans l'expérience	Adaptation au virtuel	Perception de l'écart de latence	Perturbé par l'expérience
	Moyenne sur note de 0 à 4						
Normal	2,67	2,63	2,79	3,25	3,50	1,50	0,92
Corrigée	2,79	2,88	2,83	2,96	3,46	1,35	0,75
	Test de différence de Wilcoxcon						
W	22,5	11.5	36	20	9	46,5	18
p	1	0,20	0,84	0,80	0,82	0,72	0,61

TABLE 5.4 – Résultats des questionnaires

5.5 Discussion

Cette étude a trouvé son origine dans l'observation d'un défaut du simulateur : des oscillopsies de la scène virtuelle lors d'accélérations ou décélérations. Nous nous sommes donc penchés sur la possibilité d'un écart de latences qui s'est avéré assez important. Afin de pallier ce problème, nous avons proposé et testé une solution de compensation de cet écart. Cette solution s'est montrée efficace pour réduire le mal du simulateur en conduite autonome. Le reste de cette discussion approfondira ces résultats, et ce en adoptant différents points de vue.

5.5.1 Mesures des latences

Les latences de mouvements mesurées sur le simulateur peuvent sembler assez conséquentes. Cela s'explique, toutefois, par le fait que la conception et la construction du simulateur datent de 2000, et que le système de mouvement n'a pas changé depuis. Étant un des pionniers dans ce type de simulateur, le système de mouvement possède une des premières versions de rails et la technologie a beaucoup évolué depuis. Une grande partie de cette latence est aussi due au système de contrôle des actionneurs, ainsi qu'aux sécurités qui l'accompagnent afin que le simulateur reste dans son espace de mouvement.

La latence visuelle est, quant à elle, plus normale pour ce type de simulateur. Sur les simulateurs actuels, cet écart de latence est plutôt inversé. En effet, les systèmes de mouvements se sont beaucoup améliorés et les rendus visuels se sont complexifiés, avec des systèmes de rendus affichant des résolutions jusqu'à 4K par exemple. C'est pourquoi cette solution, adaptée sur un autre simulateur dynamique, retardera sans doute le mouvement plutôt que le visuel.

5.5.2 Réduction du mal du simulateur

Notre solution de compensation de l'écart de latences s'est révélée efficace pour réduire le mal du simulateur, atteignant une réduction d'environ 40 % des symptômes de cinétoses lors d'une conduite d'un véhicule en mode autonome. La compensation de l'écart de latences est d'ailleurs majoritairement préférée par les participants, même si peu l'ont véritablement perçue. De plus, cette solution ne semble pas altérer le reste de la simulation, les participants ayant eu les mêmes expériences dans les deux configurations. Cependant, cette correction ne semble pas apporter d'amélioration à la perception du mouvement lors de la conduite, cette solution venant directement influer sur les mouvements du simulateur.

En conduite autonome, la latence globale générée par cette solution est invisible pour le conducteur, celui-ci n'exerçant aucune action impliquant ces latences. En revanche, lors

d'une conduite active, cette latence peut être perçue par les conducteurs, les déranger et perturber le contrôle du véhicule, voire augmenter le mal du simulateur. En comparaison, les véhicules réels présentant aussi un peu de latences, une latence globale de 220 ms parait encore acceptable. Le cas de la conduite active avec cette solution n'est pas traité ici, mais a pu être testé par quelques personnes lors de son développement. D'après le retour de ces personnes et par expérience personnelle, cela ne semble pas dérangeant et à peine perceptible. Cependant, ce cas mérite une étude dédiée afin de confirmer les résultats.

5.5.3 Perspectives d'amélioration

Même si l'écart de latence mouvement/visuelle est important dans la genèse du mal du simulateur, il faudrait aussi prendre en compte les autres modalités de retours de la simulation, telles que le rendu sonore et le rendu haptique entre autres. De plus, dans le cas de la simulation de conduite active, la latence du retour volant parait elle aussi essentielle. Une analyse de l'ensemble de ces latences, ainsi que l'étude de la compensation de chacune dans l'objectif d'atteindre une synchronisation totale, serait idéale.

Dans notre étude, nous nous sommes basés sur une latence globale pour les systèmes de mouvements. Cependant, chaque axe ou système de mouvements (rails vs hexapode) a des latences différentes. C'est pourquoi une synchronisation entre les rails et les vérins de l'hexapode est aussi importante. Ici, cette synchronisation est partiellement réalisée dans l'algorithme de contrôle (MCA). En outre, nous avons utilisé une valeur moyenne de latence mesurée à 0,2 Hz, valeur d'utilisation moyenne. Or, comme nous l'avons vu, cette latence peut varier avec la fréquence d'utilisation du simulateur exprimé par le retard de phase. C'est pourquoi, dans le but de fournir une solution plus efficace, une caractérisation complète de la latence de mouvement sur toute la gamme de fréquences d'utilisation du simulateur peut être menée.

5.6 Conclusion

La présente étude a examiné l'écart de latences du simulateur Ultimate ainsi que les modalités et impacts d'une solution de compensation expérimentée. Nos résultats ont montré que cette solution peut avoir un effet prophylactique sur le mal du simulateur. Cette étude confirme l'importance de la synchronisation visio-vestibulaire dans la genèse du mal du simulateur.

Cette étude a d'ailleurs été présentée lors de la conférence DSC (Driving Simulation Conférence) 2019 (cf. annexe p. XIX) et donnera prochainement lieu à une soumission pour un article vérins de l'hexapode .

Comme énoncé précédemment, une étude sur les cas de la conduite active peut être intéressante à mener. Cependant, notre attention s'est portée sur un autre phénomène, étudié ci-après.

CHAPITRE 6

ÉTUDE : MESURE DU RÉFLEXE VESTIBULO-OCULAIRE

Au cours du chapitre précédent, il nous avait été rapporté que, sur le simulateur Ultimate, la route semblait bouger ou flotter lors d'accélérations ou de décélérations. Cependant, ces oscillopsies [1] semblent encore présentes après la correction de latence. Nous avons donc orienté notre réflexion vers un autre problème potentiel lors de la simulation de conduite : l'adaptation du réflexe vestibulo-oculaire (RVO).

En effet, les interfaces visuelles et d'immersion sont connues pour induire une adaptation du RVO [M. H. Draper 1996] qui est souvent étroitement associée à l'oscillopsie [E. S. Viirre et Demer 1996]. De plus, le RVO est motivé par des réarrangements neurosensoriels des signaux visuels et vestibulaires du mouvement, mais il est aussi marqué par des symptômes similaires à ceux du mal du simulateur. Par conséquent, l'adaptation du RVO est un hypothétique facteur à l'origine du mal du simulateur.

Le déclenchement duréflexe vestibulo-oculaire par la simulation étant peu mesuré et documenté, nous nous sommes intéressés à celui-ci dans le cas de notre simulateur Utimate. Le but poursuivi est ainsi de pouvoir l'observer, l'identifier et le quantifier afin d'être capable de le limiter ou de le corriger à l'avenir.

6.1 Le réflexe vestibulo-oculaire

Le RVO est un réflexe de mouvement oculaire primitif qui aide à stabiliser les images sur la rétine pendant le mouvement de la tête, favorisant une vision claire pendant le mouvement [D. A. Robinson 2011 ; Cullen 2012]. Nous allons le présenter ici plus en détails ainsi que son lien avec le réflexe optocinétique, et notamment sa potentielle corrélation avec le mal du simulateur.

1. L'oscillopsie est la perception d'une instabilité de la scène visuelle, qui semble bouger, flotter.

6.1.1 Description

Dans notre vie quotidienne, la plus grande source potentielle de glissement rétinien est sans doute les rotations de la tête [D. A. Robinson 2011]. Par conséquent, pour pouvoir voir et bouger en même temps, les yeux doivent avoir la capacité de rester stabilisés sur leur cible lorsque la tête est en mouvement. Le réflexe vestibulo-oculaire (RVO) est, parmi les mouvements oculaires, un réflexe fondamental qui aide à stabiliser les images sur la rétine lors des déplacements de la tête. En effet, le RVO produit des mouvements oculaires compensatoires d'amplitude égale et opposée aux rotations de la tête, et ceci même en l'absence d'informations visuelles, afin de stabiliser l'axe visuel. Ainsi, à travers une fonction basique, celui-ci détient un rôle important en permettant une vision stable pendant le mouvement [Cullen 2012].

Lors d'un mouvement de la tête dans n'importe quelle direction, l'appareil vestibulaire (cf. 2.1.3) détecte immédiatement ce déplacement et envoie les informations directement au système oculomoteur. Le système oculomoteur réagit alors en déplaçant les yeux, de manière cohérente, dans une direction et une vitesse égale mais opposée. L'objectif est de compenser le mouvement de la tête afin d'aider à maintenir l'image stabilisée sur la rétine ainsi que la fixation du regard. La figure 6.1 illustre une représentation graphique de ce RVO dans le cas d'une rotation latérale. Le RVO est un réflexe oculomoteur à très faible latence, il est sans doute notre mouvement réflexe le plus rapide. Les mouvements oculaires sont générés avec une latence de seulement 4 à 10 ms [D. A. Robinson 2011].

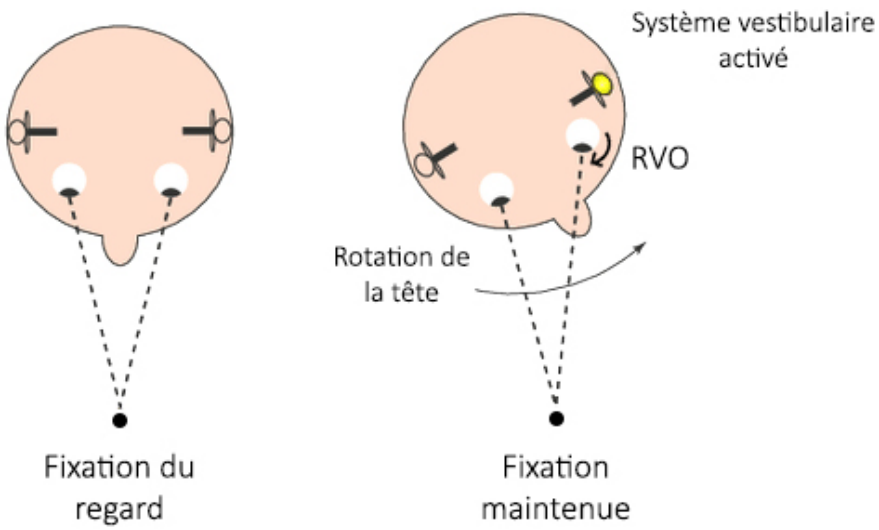


Figure 6.1 – Illustration du réflexe vestibulo-oculaire

Le RVO est actif sur toutes les rotations de la tête et suivant tous les axes de mouvement. Cependant, la plupart des études se penchent sur la réponse du RVO aux rotations le long d'un seul axe de mouvement standard : soit le RVO horizontal (dû aux rotations de lacet), le RVO vertical (dû aux rotations de tangage / inclinaison) et, dans une moindre mesure, le RVO de torsion (dû aux mouvements de roulis / inclinaison).

Bien que les organes otolithiques puissent contribuer au RVO, les canaux semi-circulaires (CSC) dominent la réponse dans la plupart des situations et l'apport otolithique n'est que mineur et transitoire [D. A. Robinson 2011]. Cela est particulièrement vrai dans le cas du RVO horizontal lors des mouvements naturels de la tête.

Ce réflexe extrêmement précis est réalisé grâce à un chemin très court : « l'arc à trois neurones » [Angelaki 2009]. Chaque canal horizontal est relié aux muscles oculaires droits externes et internes par trois neurones : le neurone vestibulaire primaire du ganglion de Scarpa, le neurone secondaire dans les noyaux vestibulaires et, enfin, le motoneurone oculaire innervant le muscle oculaire correspondant (cf. figure 6.2).

Une accélération angulaire de la tête provoque la déviation des cupules des CSC appropriés. Cette déviation amène le déplacement des cellules ciliées de la cupule et donc l'envoi de signaux proportionnels à la vitesse de la tête. Ce signal est transmis aux noyaux vestibulaires via le huitième nerf. Le noyau vestibulaire envoie ensuite le signal de vitesse oculaire approprié aux noyaux oculomoteurs, qui, à leur tour, innervent les trois paires de muscles complémentaires qui régissent les mouvements de chaque œil.

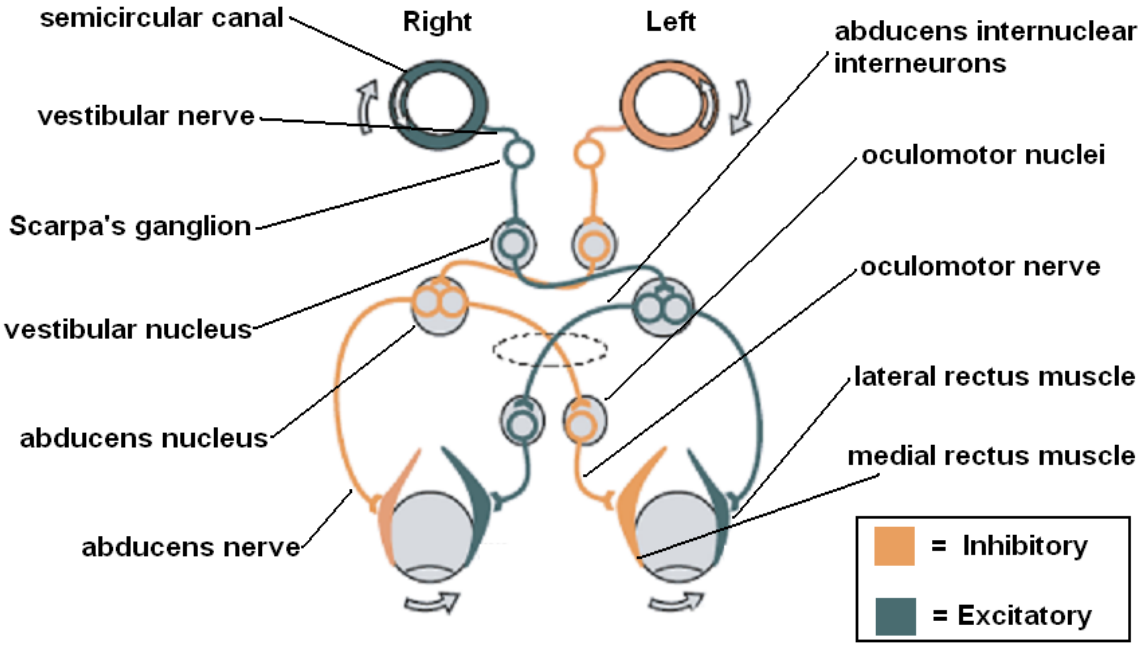


Figure 6.2 – L'arc à trois neurones impliqué dans le RVO (Wikibooks [*Système vestibulaire*])

6.1.2 Combinaison avec le réflexe optocinétique

Le RVO est physiologiquement associé au réflexe opto-cinétique (ROC) qui, quant à lui, fonctionne grâce à l'entrée visuelle [Angelaki 2009 ; Klier et Angelaki 2010]. Le ROC produit un mouvement de rotation des yeux dans le sens du défilement de la scène

visuelle, de sorte à minimiser le glissement rétinien et à faciliter la reconnaissance d'objets en mouvement dans le champ visuel. Il est facilement observable en voiture lorsque nous regardons par une fenêtre latérale et que nos yeux essayent de suivre les objets défilant sur le bord de route, par exemple les arbres et les panneaux.

Ce réflexe utilise des informations visuelles provenant de l'ensemble de la rétine, et non pas uniquement de la fovéa, afin de détecter si un glissement d'image se produit. Si un glissement se produit, un mouvement oculaire correctif est généré avec un gain égal dans la direction opposée du flux optique pour le compenser.

Par conséquent, les réflexes RVO et ROC fonctionnent tous les deux de manière synergique (cf. figure 6.3) afin de maximiser la réponse de compensation oculaire à tout mouvement de la tête. Ils ont le même objectif général et sont tous deux considérés comme involontaires. Le RVO utilise l'entrée vestibulaire pour générer des commandes de compensations oculomotrices tandis que le ROC utilise l'entrée visuelle pour faire de même. Les deux systèmes permettent ainsi de maintenir le regard de l'observateur en mouvement, ou sa cible, stable dans l'espace pendant la rotation de la tête [Ebenholtz 2001].

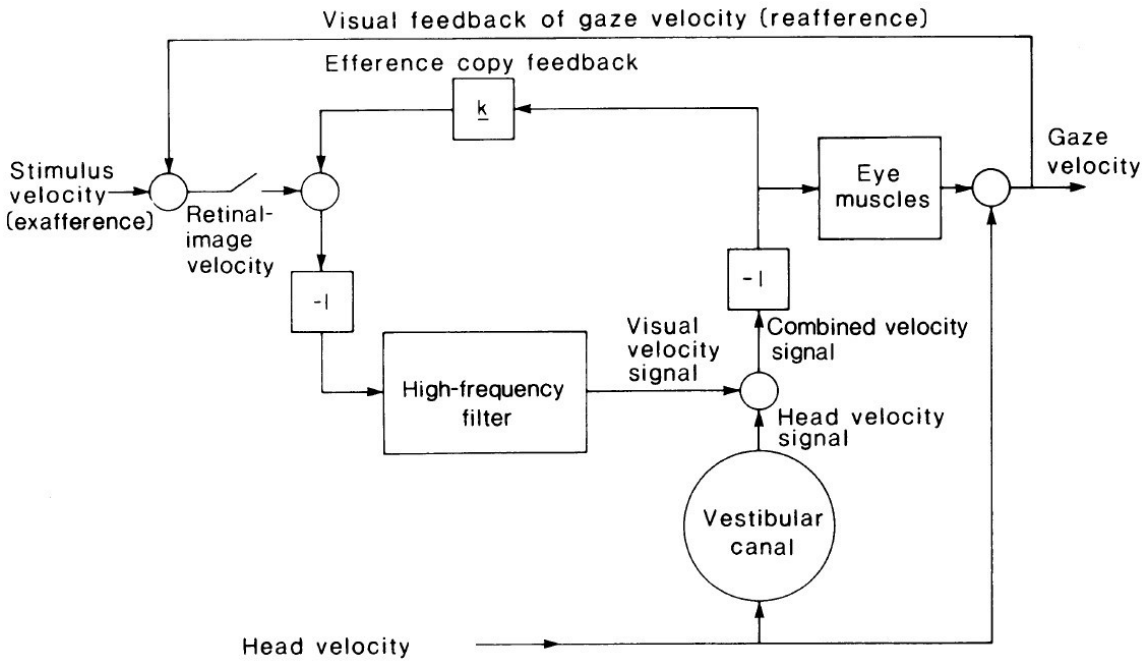


Figure 6.3 – Modélisation de la synergie RVO-ROC [D. A. Robinson 2011]

Le RVO est un réflexe très rapide pouvant compenser efficacement les mouvements de la tête à des fréquences comprises entre 1 et 7 Hz environ, surtout si le mouvement de la tête est volontaire [D. A. Robinson 2011]. Cependant, le RVO perd en précision aux fréquences moindres, en particulier celles inférieures à 0,1 Hz où le gain diminue considérablement et une avance de phase apparait. Le ROC a des caractéristiques de performances opposées. Il possède une latence plus grande car l'entrée visuelle prend du temps à traiter, mais, à basse fréquence ($< 0{,}1$ Hz), il a un gain proche de un. De 0,1 Hz à environ 1,0 Hz, le ROC perd du gain et développe un retard de phase en raison de sa latence de traitement [Angelaki 2009 ; Klier et Angelaki 2010]. À des fréquences

plus élevées, il n'arrive pas à compenser efficacement en raison de sa latence relativement grande et de son faible gain par rapport au RVO. Par conséquent, la combinaison de ces deux mécanismes permet une stabilisation d'image sur une gamme de fréquences maximales : aux fréquences basses réalisées principalement par le ROC et aux fréquences élevées grâce au RVO. Dans le cas de mouvements continus, le RVO, de par sa latence faible, réagit en premier, et le ROC va peu après prendre le relai. Le mouvement n'étant plus perçu par les CSC, avec une latence similaire au ROC, le RVO est alors inhibé.

Ces deux réflexes font partie des cinq principaux types de mouvements oculaires. Les trois autres, c'est-à-dire, les saccades, la poursuite lisse et la fixation, interagissent aussi avec le RVO pour amener et maintenir les cibles visuelles sur la fovéa. Cependant, ces mouvements ne présentent pas d'intérêt dans le cadre de notre étude et donc ne seront pas plus amplement développés.

6.1.3 Mesures et caractéristiques

Le RVO est généralement mesuré dans le noir, de sorte à ce qu'il ne puisse y avoir aucun effet contributif des autres mouvements de stabilisation d'image à base visuelle, c'est-à-dire le ROC et la fixation. Le sujet est alors mis en mouvement, soit oscillatoire sinusoïdale, soit en rotation toujours dans le même sens. Les oscillations sinusoïdales peuvent être effectuées de manière passive, en utilisant une chaise rotative (cf. figure 6.4), soit activement par des mouvements de tête effectués par les sujets. Les sujets reçoivent généralement une tâche spécifique à effectuer pendant les tests, le plus souvent la fixation d'un point imaginaire au loin, soit du calcul mental. Le mouvement des yeux est enregistré par différents procédés, puis les mouvements de phase lents sont extraits et les résultats sont comparés aux mouvements associés de la tête pour déterminer les caractéristiques de RVO. Toutefois, d'autres méthodes de mesure du RVO existent également [Adachi et al. 2014, par exemple].

Figure 6.4 – Exemples d'instrumentations de mesure du RVO (`www.medicalexpo.fr`)

De la mesure du RVO se dégage deux caractéristiques principales : le gain et la phase.

Le gain du RVO est la vitesse de l'œil en phase lente par rapport à la vitesse de la tête. La phase indique la latence relative des mouvements oculaires en réponse aux mouvements de la tête. La phase est donc considérée comme l'angle entre le mouvement de la tête et la réponse du mouvement des yeux.

Le RVO est sans doute notre mouvement réflexe le plus rapide. En effet, comme vu précédemment, ce réflexe n'implique que trois neurones. En réponse au mouvement de la tête, les mouvements oculaires sont générés avec une latence de seulement 5 à 13 ms suivant les études. Cette courte latence est en accord avec des retards synaptiques et axonaux minimaux.

Le RVO agit comme un filtre passe-bande [D. A. Robinson 2011 ; Angelaki 2009 ; Klier et Angelaki 2010] sur la gamme de fréquences de 1 à 7 Hz. En effet, le RVO devrait bien fonctionner à ces fréquences car elles correspondent aux activités quotidiennes : le mouvement de la tête en marchant est d'environ 1 Hz, et celui de la course est d'environ 4 à 6 Hz. À des mouvements de tête à très basse fréquence ($< 0{,}05$ Hz), la compensation du RVO est médiocre avec un gain faible. Entre 0,05 et 1,0 Hz, le gain du RVO augmente mais reste compris entre 0,50 et 0,85. À des fréquences de mouvement de tête plus élevées, de 1 à 7 Hz, le RVO est très réactif avec un gain proche de 1 et un mouvement des yeux en phase avec le mouvement de la tête. À des fréquences encore plus élevées (> 7 à 8 Hz), le système se désactive avec, par conséquent, un gain du RVO décroissant et un retard de phase augmentant. C'est pourquoi les réponses du RVO sont souvent caractérisées avec la gamme de fréquences des mouvements de la tête à laquelle il a été mesuré.

L'activité mentale des sujets lors des mesures de RVO est un facteur important à prendre en compte. En effet, si le sujet est mentalement actif sur une autre tâche, le gain du RVO sera plus faible [Angelaki 2009 ; Klier et Angelaki 2010 ; D. A. Robinson 2011]. C'est pourquoi lorsque l'on demande d'effectuer du calcul mental pendant la mesure, le gain du RVO diminue et atteint en moyenne environ 0,65. Si toutefois il est demandé au sujet d'imaginer et de fixer un point sur le mur dans l'obscurité totale, le gain du RVO augmente jusqu'à presque l'unité. De plus, si on demande au sujet de fixer un endroit de la chaise sur laquelle il est assis, ou bien de maintenir le regard droit devant lui, le gain du RVO tombe à 0,2 ou moins. Ce phénomène où le sujet peut consciemment empêcher le réflexe est appelé suppression du RVO. En effet, être alerte ne suffit pas, le sujet doit également être attentif à l'environnement ou fixer un objet.

Le RVO est également affecté par la distance de la cible [E. S. Viirre et Demer 1996]. Pour les cibles éloignées, le gain RVO est proche de 1,0 mais va augmenter à mesure que la cible est proche de l'observateur. Ceci est logique car la réponse oculaire requise pour éviter le glissement rétinien augmente également à mesure que la cible se rapproche. La façon dont le RVO module sa réponse en fonction de la distance à la cible n'est, cependant, pas complètement comprise pour l'instant.

Il est également possible de faire la distinction entre le RVO d'un sujet qui est déplacé passivement (le RVO passif) et le RVO d'un sujet qui bouge activement la tête (le RVO actif). En effet, les RVO actifs sont plus robustes et moins variables de 3 % à 13 % que les RVO passifs dans presque toutes les conditions [Klier et Angelaki 2010]. Cela est dû à la prévision du mouvement grâce à l'ajout d'une copie d'efférence du mouvement.

D'autres facteurs influencent eux aussi le RVO, comme l'éclairage de l'environnement ainsi que la complexité de la scène. La fatigue, les médicaments, etc. influent aussi sur le RVO en diminuant l'attention.

6.1.4 Adaptation et cinétoses

Un aspect important du RVO est sa capacité à se recalibrer en réponse à des conditions changeantes [D. A. Robinson 2011 ; E. Viirre et al. 1998]. Cela signifie que des situations où il y a un décalage entre les paramètres actuels du RVO et ceux nécessaires au maintien de l'image stabilisée sur la rétine vont alors amener à une adaptation. Ces divergences peuvent être dues à des modifications biomécaniques en raison des effets de l'âge, de la maladie ou de traumatisme sur l'appareil vestibulaire et/ou les muscles oculaires [Reymond 2000]. Ces écarts peuvent aussi être dus à des éléments externes qui modifient le mouvement relatif de la scène visuelle, par exemple avec des lunettes de vue, de masque de plongée (grossissant l'image) ou encore la réalité virtuelle [Reymond 2000 ; M. H. Draper et al. 2001]. Quelle que soit l'origine de la divergence, le RVO est capable d'apporter des modifications adaptatives, plastiques, à ses paramètres afin de corriger la différence et de s'adapter à l'environnement.

Il a été observé dès 1970 que des situations cinétogènes pouvaient déclencher des RVO [Sjoberg 1970], entrainant par ailleurs des phénomènes d'oscillopsies. Par la suite, de nombreuses études portant sur l'adaptation du RVO [Zupan et al. 1994 ; Shupak et al. 1990 ; M. H. Draper 1996 ; Tanguy et al. 2008 ; E. Viirre et al. 1998 ; Jeong et al. 2010] ont montré que les sujets, humains, chiens, chats ou singes, ressentent généralement des symptômes de cinétoses. Ces manifestations telles que étourdissements, nausées, instabilité posturale, apparaissent lors de l'adaptation du RVO à des stimulus visio-vestibulaire modifiés. De plus, la plupart de ces études montrent également une réapparition de ces mêmes symptômes immédiatement après la suppression du stimulus altéré, symptômes qui se prolongeraient le temps que les sujets se réadaptent à leur environnement normal [Shupak et al. 1990]. Ces observations d'adaptation et de réapparition des symptômes post-exposition présentent les mêmes caractéristiques que l'adaptation des cinétoses avec le « mal du débarquement ». Par ailleurs, la vue et le système vestibulaire sont deux des éléments importants et nécessaires à la génération des cinétoses [J. Reason et Brand 1975 ; J. F. Golding 2006a ; J. E. Bos et al. 2002 ; Dai et al. 2011], tout comme pour le RVO. Finalement, l'adaptation du RVO se présente aussi sous la forme d'un réarrangement neurosensoriel conformément à la théorie de Reason [J. T. Reason 1978 ; M. H. Draper 1996 ; Carcaud et al. 2017].

Étant donné les similitudes de caractéristiques, de symptômes, et d'organes déclencheurs, il est raisonnable de supposer que les cinétoses et l'adaptation du RVO peuvent être corrélées. C'est pourquoi de nombreuses études se sont penchées sur la question afin de trouver de possibles corrélations entre les caractéristiques du RVO et la susceptibilité aux cinétoses, particulièrement afin d'utiliser le RVO comme une mesure prédictive [J. E. Bos et al. 2002 ; Sjoberg 1970 ; Idoux et al. 2018 ; Dai et al. 2007 ; Nachum et al. 2002 ; Gordon et al. 1996 ; Zupan et al. 1994 ; Shupak et al. 1990]. Cela s'illustre, par

exemple, avec une différence de la sensibilité au mal de mer suivant les caractéristiques personnelles du RVO [J. E. Bos et al. 2002 ; Shupak et al. 1990], ainsi que l'évolution de ces caractéristiques après plusieurs mois d'habituation en mer [Shupak et al. 1990]. Cependant, les résultats obtenus ont encore du mal à corréler les caractéristiques du RVO et la susceptibilité aux différentes cinétoses. Néanmoins, la sensibilité individuelle au mal des transports semble tout de même liée aux propriétés spatio-temporelles du réflexe via l'activation du mécanisme de stockage de la vitesse [J. E. Bos et al. 2002 ; J. R. Lackner 2014 ; Cohen et al. 2003].

Malgré ces résultats mitigés, une théorie récente de l'origine du mal du simulateur stipule qu'il serait en partie lié au RVO, notamment en raison d'un phénomène d'adaptation de celui-ci [Ebenholtz et al. 1994 ; Shupak et al. 1990 ; Dg 1987 ; Ebenholtz 1992] (cf. 3.2.5). Cette théorie se retrouve notamment avec des adaptations visio-vestibulaires face aux interfaces virtuelles ou en immersion virtuelles (casque, CAVE, écrans, etc.) [M. Draper 1998 ; Cannon et al. 1985]. D'après cette théorie, les caractéristiques (latences, échelle, etc.) des interfaces visuelles des simulateurs déclencheraient des RVO inappropriés, générant des oscillopsies. Une adaptation du RVO est alors enclenchée afin de corriger ce défaut de vision, amenant par la même occasion plus de symptômes de cinétoses [M. Draper 1998 ; M. H. Draper et al. 2001]. Finalement, ces déclenchements inopinés du RVO pourraient aussi être déclenchés par les techniques de restitution de mouvements des simulateurs RVO [Adachi et al. 2014].

6.2 Simulation et réflexe vestibulo-oculaire

Grâce à une connaissance désormais plus approfondie du réflexe vestibulo-oculaire et de son influence sur le mal du simulateur, nous pouvons nous consacrer au cas de la simulation de conduite. Nous présenterons ici les différentes hypothèses d'apparition du RVO dans le cas de la simulation de conduite sur simulateur dynamique, ainsi qu'une proposition d'études et une caractérisation de ce facteur pour la simulation dynamique.

6.2.1 Rendu inertiel par inclinaison

Tous les simulateurs dynamiques ne disposent pas de rails de déplacement X-Y, c'est pourquoi ceux-ci utilisent alors des techniques de « tilt simulation » en simulant les accélérations du véhicule par l'inclinaison de la cabine. Cependant, les simulateurs avec des rails, comme le simulateur Ultimate, ne peuvent pas non plus reproduire toutes les accélérations étant, entre autres, limités par la taille de ces mêmes rails. C'est pourquoi ces simulateurs utilisent des techniques similaires mêlant les deux rendus : le « tilt coordination », utilisant les accélérations réelles, et le rendu d'inclinaison [COLOMBET et al. 2015 ; Fang, Colombet et al. 2014].

Tel que vu précédemment (cf. Chapitre 2), le corps humain perçoit les accélérations entre autres grâce à l'oreille interne. Cependant, le système otholitique présente une ambigüité de perception (cf. 2.1.3) : en effet, celui-ci ne peut pas différencier une accélération horizontale d'une inclinaison autour de l'axe horizontal. Dans la mesure où la composante horizontale de la gravité est une accélération verticale orientée vers le bas, alors une inclinaison autour de l'axe horizontal déplace ainsi les otolithes. En simulation de conduite, cette ambigüité gravito-inertielle est exploitée afin de simuler des sensations d'accélération horizontale. Ainsi, l'inclinaison de la cabine est utilisée dans les stratégies de contrôle de mouvement afin de restituer une partie des accélérations du véhicule (cf. figure 6.5).

De plus, cette ambigüité gravito-inertielle est souvent résolue par le cerveau grâce aux autres indices perceptuels, notamment la vision [Angelaki et Yakusheva 2009 ; Vidal et al. 2015]. Or, le conducteur étant plongé dans la simulation, celui-ci ne va pas voir l'inclinaison de la cabine mais croire qu'il est dans un véhicule en accélération, solutionnant ainsi l'ambigüité en faveur d'une accélération plutôt que d'une inclinaison.

En prenant θ l'angle d'inclinaison, l'accélération simulée pour le conducteur peut alors être exprimée comme suit :

$$\overrightarrow{a_{simulée}} = \overrightarrow{a_{rails}} + \overrightarrow{g \sin \theta}$$

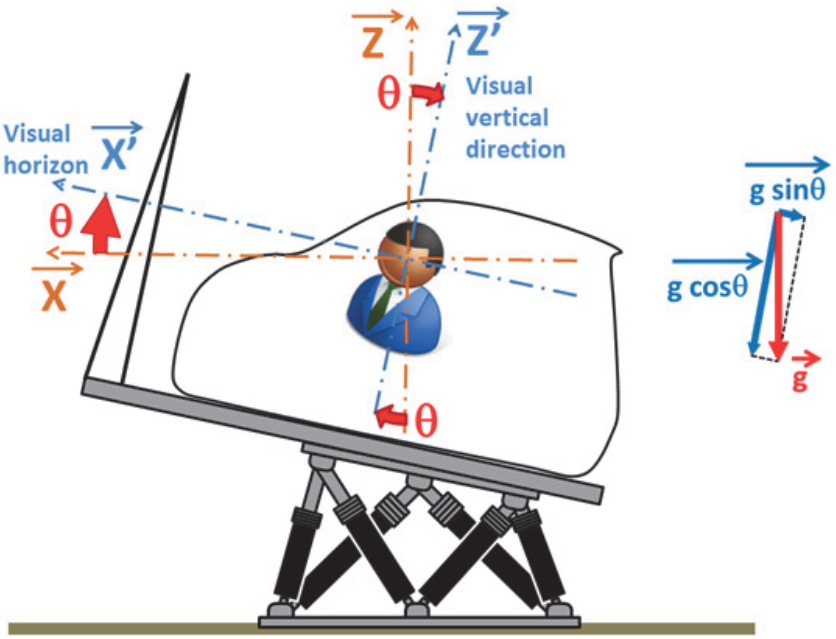


FIGURE 6.5 – Simulation de l'accélération par inclinaison de la cabine [COLOMBET et al. 2015]

Néanmoins, malgré cette ambigüité en inclinaison, le système vestibulaire est, grâce aux canaux semi-circulaires (CSC), sensible aux rotations. Étant donné que la perception des rotations par les CSC participe à la résolution de l'ambigüité otolithique, il est intéressant de rester sous les seuils de perception afin de créer l'illusion. C'est pourquoi, en simulateur dynamique équipé de rails, l'accélération s'effectue d'abord avec les rails pendant que la cabine s'incline doucement afin de prendre le relais pour simuler les accélérations soutenues. Pour des simulateurs dynamiques sans rails, la rotation dépend directement de l'accélération et ne peut pas toujours s'effectuer sous les seuils de perception.

C'est pourquoi la caractérisation des seuils de perception des rotations est importante pour l'utilisation de la technique de tilt coordination. Se basant sur le modèle dynamique des CSC, Mulder [GUEDRY 1974] propose une loi perçue du taux d'inclinaison et donne un seuil de taux d'inclinaison d'environ $2\,°\,s^{-1}$, indépendamment d'une accélération de rotation. Ce seuil, assez bas, est une valeur peu utilisable dans le cas des simulateurs actuels, si ce n'est pour des déplacements très faibles, et ce en raison de la longueur des rails (5,2 m par exemple pour Ultimate). Néanmoins, la charge mentale n'est pas la même en simulation de conduite dynamique. En effet, des études montrent des seuils plus élevés dans ces situations, aux alentours de $6\,°\,s^{-1}$ [PRETTO et al. 2014] pour des conducteurs ordinaires. Dans la mesure où ces seuils peuvent varier avec l'expérience des conducteurs, des pilotes professionnels seront capables de détecter des rotations plus faibles.

De plus, de précédentes études menées sur le simulateur Ultimate confirment ces résultats avec des seuils d'acceptabilité de $5\,°\,s^{-1}$ en roulis [FANG, COLOMBET et al. 2014] et de $6\,°\,s^{-1}$ en tangage [COLOMBET et al. 2015]. Ces seuils sont ainsi ceux utilisés couramment sur le simulateur Renault Ultimate, permettant ainsi une utilisation plus efficace de l'espace de travail disponible.

6.2.2 Hypothèses d'étude

Lors de la simulation de conduite dans Ultimate, le phénomène de mouvements et d'instabilité de la route nous a été rapporté, particulièrement pendant les phases d'accélération ou de décélération et cela même avec la correction de latences. Or, ces oscillopsies dérangent les conducteurs et peuvent perturber leur perception. De plus, des oscillopsies sont signes de glissements rétiniens, c'est-à-dire que le point de focus oculaire n'est pas fixe par rapport à la rétine. Les perturbations sensorielles et le glissement rétinien peuvent être deux facteurs importants du déclenchement de cinétoses [Kolasinski 1995]. Dans un second temps, les oscillopsies peuvent constituer un élément caractéristique d'un déclenchement inopiné du RVO ainsi que de son adaptation [E. S. Viirre et Demer 1996 ; Sanderson et al. 2007 ; Straube et al. 2012]. C'est pourquoi nous supposons que le simulateur Ultimate déclencherait des RVO inopinés lors de la simulation. Ce déclenchement peut amener à une adaptation de ce réflexe [Straube et al. 2012 ; Klier et Angelaki 2010], non présente dans le cas d'une conduite réelle, et sans doute source de mal du simulateur.

Nous estimons, de plus, que ce déclenchement du RVO est en partie dû au rendu d'accélération par inclinaison de la cabine. En effet, ces oscillopsies sont particulièrement rapportées lors des grandes accélérations et décélérations, voire des virages serrés. De plus, le RVO est déclenché par les mouvements de rotations de la tête, mouvements qui sont utilisés dans les techniques de « tilt simulation » et « tilt coordination » afin d'incliner la cabine à un angle voulu. Si l'inclinaison est trop rapide, le conducteur peut percevoir le mouvement de basculement de la simulation de conduite [Fang, Colombet et al. 2014], mouvement qui n'existe pas dans le cas d'une conduite réelle. Si le conducteur perçoit une rotation, le RVO est déclenché, entrainant une correction inutile du regard du conducteur [Adachi et al. 2014]. Ce déclenchement inapproprié du RVO décale alors le regard du conducteur par rapport au visuel affiché (cf. figure 6.6), créant ainsi du glissement rétinien. Par conséquent, ce glissement de l'image sur la rétine risque alors de déclencher le ROC, permettant par la suite une correction de la déviation du regard. Finalement, les déclenchements inappropriés de ces deux réflexes ainsi que le glissement rétinien amènent alors à une adaptation du RVO.

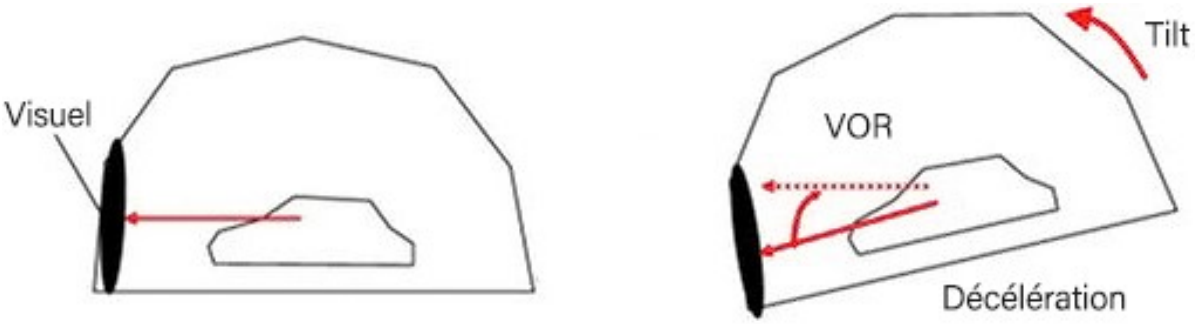


Figure 6.6 – Déclenchement inapproprié du RVO en simulation dynamique

Par ailleurs, le seuil de perception de ces rotations de la cabine est aux alentours de $5\,^{\circ}\,\mathrm{s}^{-1}$ dans le cas de la simulation de conduite multisensorielle, même si le seuil théorique de détection des CSC est aux alentours de $2\,^{\circ}\,\mathrm{s}^{-1}$. C'est pourquoi nous pensons que

même si le conducteur ne perçoit pas consciemment les rotations entre 2 et $5\,^{\circ}\,\mathrm{s}^{-1}$, les CSC sont quand même activés, déclenchant ainsi des RVO. Par conséquent, nous estimons que certaines rotations de la cabine peuvent déclencher le RVO même si l'algorithme de contrôle d'Ultimate utilise la technique de « tilt coordination » avec des seuils de rotations inférieurs à la perception en simulation. Ce déclenchement pourrait s'effectuer malgré une stimulation multisensorielle augmentant la charge mentale.

Finalement, nous concluons que ces phénomènes pourraient être sources d'accentuation de cinétoses. En effet, le glissement rétinien indésiré peut déclencher des conflit entre les sensations vestibulaires et visuelles du conducteur. Étant donné les théories de Ebenholtz et al. 1994 et M. H. Draper 1996, l'adaptation du RVO peut constituer une source de cinétoses et être à l'origine de certains symptômes. De plus, il a été démontré que le mal du simulateur diminuait avec la réduction de la fréquence de coupure des algorithmes de « tilt coordination », fréquence séparant l'accélération des rails de l'inclinaison de la cabine [Adachi et al. 2014].

6.2.3 Objectif de l'étude

Au regard de nos précédentes hypothèses, il serait intéressant de travailler à réduire ou limiter le déclenchement inopiné de ce RVO, que ce soit grâce à des corrections des algorithmes de contrôles, de solutions visuelles ou autres. Une diminution de la fréquence de coupure parait une solution assez simple et déjà éprouvée [Adachi et al. 2014]. Cependant, pour toute autre solution, cela semble plus compliqué. En effet, comme vu précédemment, les caractéristiques du RVO varient en fonction de l'environnement, par exemple l'éclairage et la complexité de la scène, mais aussi selon la charge mentale [Angelaki 2009]. Ces facteurs peuvent être assez importants dans le cas de la simulation de conduite. Or, les mesures classiques du RVO sont effectuées dans le noir avec des stimulations sensorielles et mentales faibles. De plus, peu d'études se sont penchées sur l'identification du RVO en simulation, son possible déclenchement par les techniques de rendu par inclinaison, ainsi que ses caractéristiques.

C'est pourquoi cette étude se penchera sur l'identification de potentiels déclenchements inopinés du RVO lors de l'utilisation de rendu par inclinaison. Il s'agira de voir si ce réflexe peut être déclenché sous le seuil de perception des rotations en simulation de conduite immersive. Cette étude permettra, de plus, de caractériser ce RVO indésiré pour une meilleure compréhension pouvant permettre l'amélioration des algorithmes de contrôles du simulateur Ultimate. Elle pourra sans doute aussi permettre une identification de possibles solutions, comme une solution visuelle limitant le glissement rétinien, en suivant le mouvement des yeux.

Cette étude va se concentrer sur le possible déclenchement du RVO dû à l'utilisation d'une technique de rendu par inclinaison (« tilt simulation ») et, dans un premier temps, sur le cas des accélérations longitudinales par d'inclinaisons de tangage. Ces accélérations sont généralement les plus communes et les plus fortes lors de simulation de conduite.

6.3 Protocole de mesure

Suite aux hypothèses et aux objectifs posés précédemment, cette campagne de mesure s'est concentrée sur le cas des accélérations longitudinales. Ces accélérations sont généralement reproduites avec la combinaison des rails et de l'hexapode.

Nous nous sommes donc intéressés à la mesure du RVO lors de vitesses d'inclinaison inférieures au seuil de perception des rotations en tangage ($6\,°\,s^{-1}$ [COLOMBET et al. 2015]) tout en étant supérieures au seuil de détection des CSC ($2\,°\,s^{-1}$ [Guedry 1974]). C'est pourquoi nous avons choisi des vitesses d'inclinaison de 3, 4 et 5 $°\,s^{-1}$ pour nos mesures. Ces inclinaisons ont été mesurées, dans un premier temps, sans coordination avec les rails afin de pouvoir observer clairement le RVO.

6.3.1 Système et contrôle plate-forme

Cette campagne de mesure s'est déroulée chez Renault sur Ultimate, simulateur dynamique haute performance à 8 degrés de liberté. Cependant, les rails du simulateur n'ont pas été utilisés, seule la plateforme 6 axes a été utilisée afin de créer des mouvements de tangage pur pour les conducteurs.

Au vu des besoins spécifiques de vitesses d'inclinaison, nous avons utilisé des algorithmes de contrôles (MCA) spécifiques aux sollicitations voulues. Ces MCA sont des adaptations d'un algorithme de Rengifo et al. 2019 où les paramètres ont été ajustés afin d'obtenir les vitesses désirées (3, 4 et $5°\,s^{-1}$) avec l'inclinaison maximale de la cabine (6°). Ces paramètres ont été ajustés en même temps que le scénario afin d'obtenir exactement les sollicitations voulues pour les conducteurs avec la cohérence du scénario. Les différents mouvements d'inclinaison en réponse à un créneau d'accélération du scénario sont représentés ci-dessous (figure 6.7) :

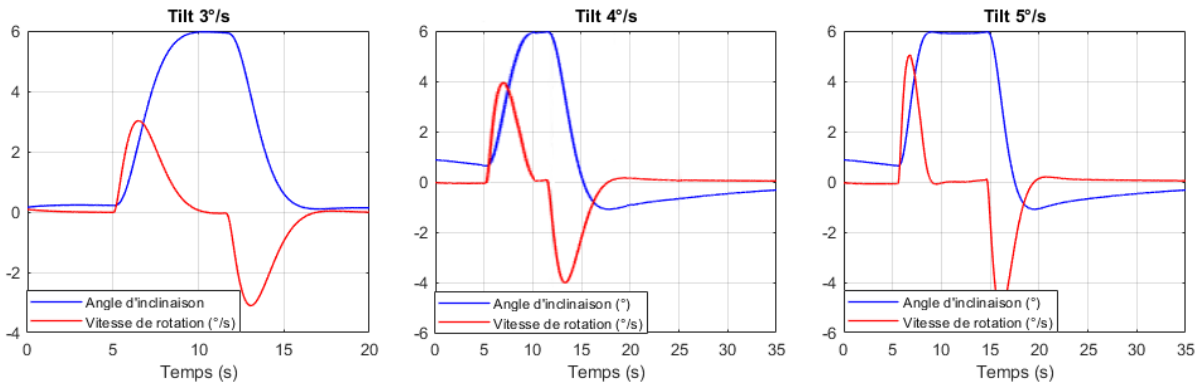


Figure 6.7 – Mesures d'inclinaison de la cabine avec les différents MCA pour un créneau d'accélération

Dans la boucle de simulation du simulateur Ultimate, toutes les accélérations linéaires et de rotation se font autour de la position théorique de la tête du conducteur dans le

véhicule virtuel ou la cabine. Ainsi, lorsqu'une rotation est appliquée au simulateur, les accélérations au niveau de la tête générées par l'écart entre la position de la tête et l'axe de rotation de la cabine sont minimisées.

6.3.2 Scénario de conduite

Nous avions besoin d'un scénario simple afin de réaliser la mesure du RVO et de placer les participants dans les conditions de simulation de conduite. Nous avions seulement besoin de générer des créneaux d'accélération suffisants pour créer l'inclinaison nécessaire de la cabine.

Le scénario a été développé avec le logiciel de simulation de conduite SCANeR™ Studio 1.8. Nous avons créé une autoroute droite et infinie où la voiture des participants est libre pour ses accélérations. Il n'y a aucun décor autre que l'autoroute (cf. figure 6.8) afin d'éviter que le regard des participants ne soit attiré par des détails. Afin de créer un point de fixation du regard, concentrer le regard des participants et faciliter l'analyse des mesures, nous avons placé une voiture rouge à 100 m devant le conducteur. Cette voiture constitue la cible du regard des participants, servant de point de fixation du regard nécessaire au déclenchement des RVO.

FIGURE 6.8 – Vue de la cabine lors de la simulation

Afin de pouvoir obtenir l'inclinaison maximale de la cabine (6°) pour les 3 configuration de MCA, la voiture EGO a été sollicitée avec des créneaux d'accélération de $-2\,\mathrm{m\,s^{-2}}$. Dans le but d'obtenir plusieurs mesures et dans les deux sens, la voiture a subi consécutivement trois fois un créneau d'accélération, suivi chacun par un créneau inverse de décélération de $-2\,\mathrm{m\,s^{-2}}$. Une fois le scénario lancé, la voiture était en mode autonome. Elle accélérait jusqu'à 90 km/h, faisait les six créneaux et finalement s'arrêtait (cf. figure

6.9). Le scénario était assez court afin de pouvoir les enchainer sans que les participants ne se lassent et deviennent moins attentifs.

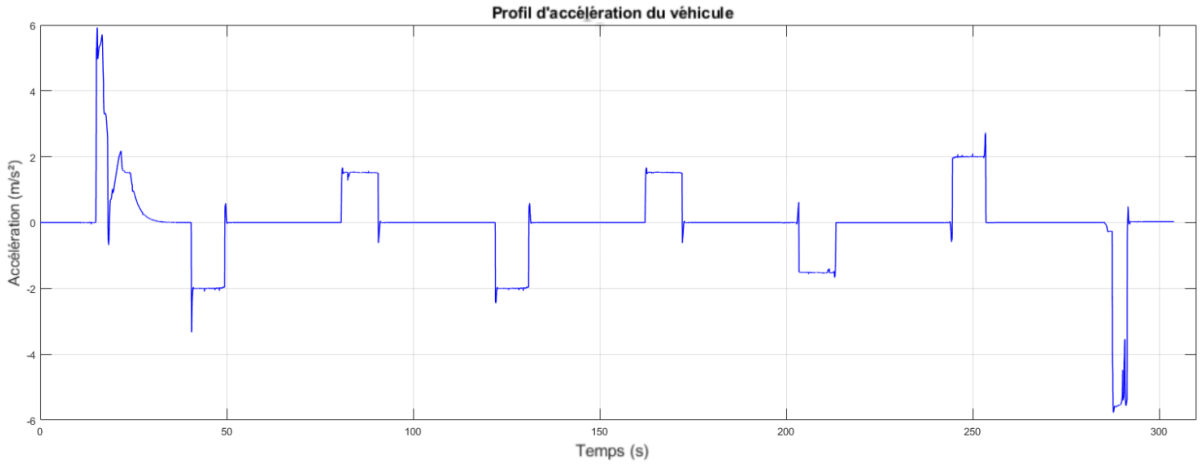


FIGURE 6.9 – Profil d'accélération du véhicule EGO

6.3.3 Mesures

Plusieurs solutions ont été envisagées afin de mesurer précisément les mouvements des yeux, comme par exemple l'électro-oculographie (EOG). La solution retenue est les lunettes d' « eye-tracking » Pupil-Core (cf. figure 6.10) de GAZE INTELLIGENCE [*Eye Tracking*] et PUPIL LABS [*Pupil Core*]. Ces lunettes utilisent les techniques de vidéo-oculographie et de réflexion infra-rouge (IR). Cette solution a été retenue car elle est facile à mettre en œuvre dans le simulateur, peu intrusive pour les participants (sauf en cas de lunettes de vue), et suffisamment précise pour nos besoins sans être perturbée par la simulation.

FIGURE 6.10 – Lunettes d'eye-tracking Pupil Core de PUPIL LABS [*Pupil Core*]

La mesure du mouvement des yeux s'effectue grâce à deux petites caméras IR, accompagnées d'un émetteur IR, filmant les yeux à la limite du champ de vision (cf. figure 6.10). Grâce à l'image IR, la pupille est facilement identifiable et, par analyse d'images, l'orientation des yeux est ensuite extraite. Ces lunettes permettent une précision de 0,6° à une fréquence d'échantillonnage de 200 Hz.

La capture des mouvements des yeux et du regard se fait en temps réel grâce au logiciel Pupil Capture sur un PC dédié dans le simulateur. Ce PC est connecté au réseau du simulateur afin de permettre une synchronisation de la mesure avec la simulation. Cette synchronisation est réalisée grâce aux API de Pupil Captur et de SCANeR™ Studio à travers un script Python. Ce script permet le lancement de la mesure ainsi que le marquage d'évènements pour la synchronisation.

L'analyse d'image et l'extraction de la mesure ont été réalisées grâce au logiciel Pupil Player. Ce logiciel permet un large panel d'analyses des yeux et du regard, bien que dans notre cas nous en ayons seulement extrait l'orientation des yeux.

Comme pour les précédentes études, les sujets étaient amenés à remplir anonymement un questionnaire afin d'évaluer la population testée ainsi que leurs perceptions des mouvements d'inclinaison, ou non, lors de la mesure (cf. annexe p 7.2).

6.3.4 Déroulement de l'étude

Les participants étaient informés uniquement de la mesure des mouvements des yeux, et ce lors de la simulation suivant différents algorithmes de contrôle plateforme. Ils n'avaient pas connaissance que la mesure se concentrait sur le RVO, ni de la différence existant entre les MCA. Au cours de l'expérience, ils étaient libres d'interrompre le protocole à tout moment, surtout s'ils se sentaient malades durant la simulation. Le déroulement de l'expérimentation pour un participant est illustré ci-dessous (cf. figure 6.12).

Premièrement, une explication des différentes consignes était donnée aux participants. Les participants étaient ensuite positionnés au poste de conduite du simulateur et les lunettes de mesure leurs étaient installées (cf. figure 6.11). Puis, la calibration du système de mesure était effectuée avec l'affichage de différentes cibles visibles à l'écran par le participant. Le contrôle plateforme était chargé suivant un ordre tiré aléatoirement afin d'éviter l'effet d'ordre, puis le scénario était lancé. Au cours du scénario, les participants étaient accompagnés au micro, surtout lors des démarrages et des arrêts du véhicule. Ils recevaient également des explications complémentaires ou des rappels de consignes. Une fois le scénario achevé, le véhicule était arrêté et le participant disposait d'une petite pause pendant le changement de MCA. Le scénario était ensuite relancé jusqu'à avoir passé les trois différents MCA. Une fois toutes les configurations réalisées, les impressions et les perceptions des participants étaient collectées et suivies d'un moment d'échange afin de leur expliquer l'étude et répondre à leurs questions.

FIGURE 6.11 – Participant avec les lunettes de mesure pendant la simulation

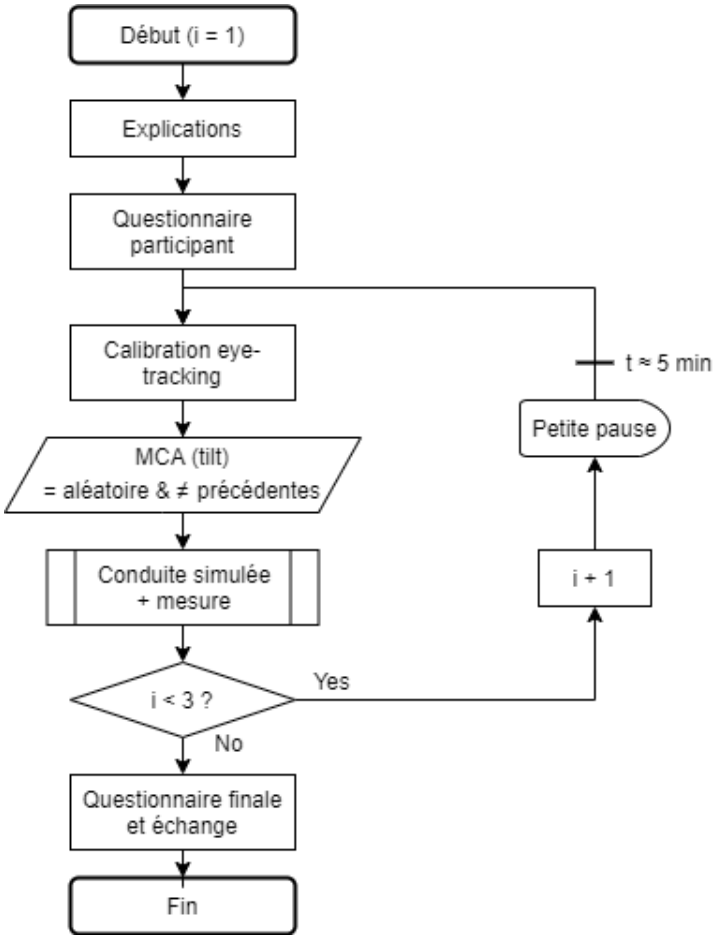


FIGURE 6.12 – Déroulement de la mesure du RVO pour un participant

6.3.5 Participants

Les participants de l'étude étaient divers volontaires travaillant chez Renault. Nous avons pu faire passer quarante-deux personnes pour cette étude (cf. figure 6.1), soit trente hommes et douze femmes. Les sujets étaient âgés de 23 à 60 ans, avec une moyenne à 34,4 ans et un écart type de 10,8 ans. Tous les participants étaient en possession d'un permis de conduire valide et présentaient diverses expériences de conduite. 16 participants disposaient de lunettes de vue mais pouvaient s'en passer pendant la mesure, ces dernières étant impossible à combiner avec les lunettes de mesure. Les conducteurs testés étaient plutôt des conducteurs assez réguliers, pratiquant des trajets journaliers. Cependant, les sujets semblaient peu sensibles au mal des transports, tout en étant peu habitués à la simulation de conduite (ou la réalité virtuelle). Les participants passaient sur les trois configurations afin de limiter des effets de différences interpersonnelles.

	Âge (ans)	Nombres d'années de permis	Conduis tous les jours (0-4)	Sensible au mal des transports (0-4)	Habitué aux simulations (0-4)
Moyenne	34,4	15,2	4,05	1,62	2,51
Écart-type	10,8	10,9	1,45	0,85	1,35

Table 6.1 – Statistiques de la population testée

6.4 Résultats

Nous allons présenter ici les résultats qui ont pu être déduits de l'étude de cette campagne de mesures.

6.4.1 Analyse des données

Suite à cette campagne de mesures, nous avons collecté 290 Go de données : des vidéos IR des yeux et les positions du regard sur la scène (cf. figure 6.13). L'analyse des images et l'extraction des données (mouvements des yeux) s'est faite avec le logiciel Pupil-Player de Pupil- Labs, puis exportée sur des feuilles de calculs (.csv).

FIGURE 6.13 – Exemple des données récoltées avec Pupil-Player

Les données extraites ont ensuite été traitées avec un script en Python, facilitant et automatisant l'analyse au vu du volume consquent de données. En effet, environ 1500 mesures ont été analysées : 42 participants, 3 MCA, 6 paliers d'accélération soit 12 rotations. Les passages intéressants ont été isolés et extraits grâce aux marqueurs de synchronisation. Le signal représentant l'angle oculaire étant quelque peu bruité, nous avons donc appliqué un filtre de convolution afin d'obtenir un signal plus clair pour l'analyse (cf. figure 6.14).

L'identification du RVO et la mesure de ces caractéristique étant difficilement automatisable, cette étape s'est faite manuellement. Sur la majorité des passages isolés (cf. figure 6.15), une déviation des yeux est clairement observable peu de temps après le début du mouvement, correspondant à un RVO. Cette déviation est souvent corrigée peu de temps après, correspondant à un ROC. De plus, ce mouvement est bien orienté dans le sens inverse de la rotation du simulateur.

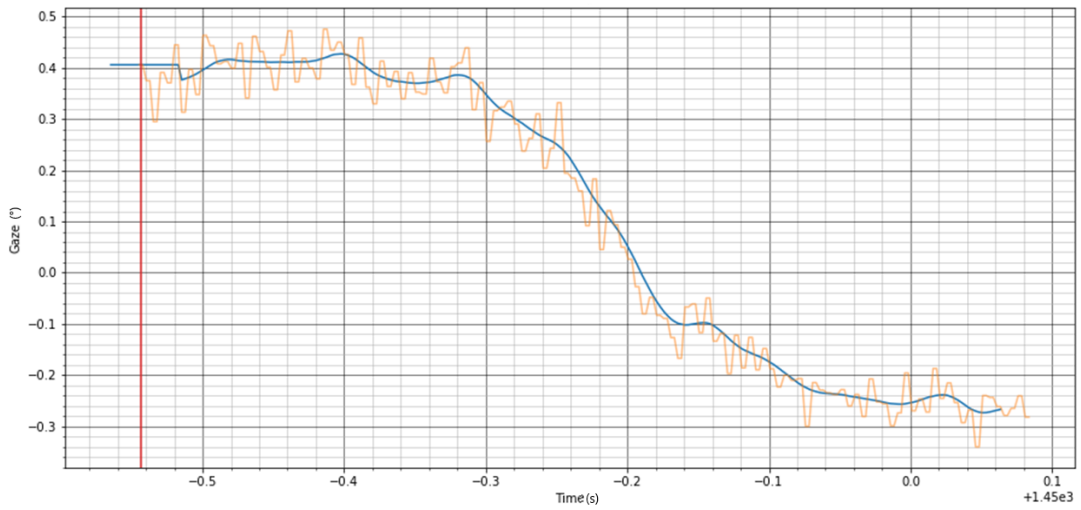


FIGURE 6.14 – Exemple de mesure de l'angle de rotation de l'œil, isolée et filtrée. (En rouge le marquage du début de la rotation, en orange le signal mesuré et en bleu le signal filtré)

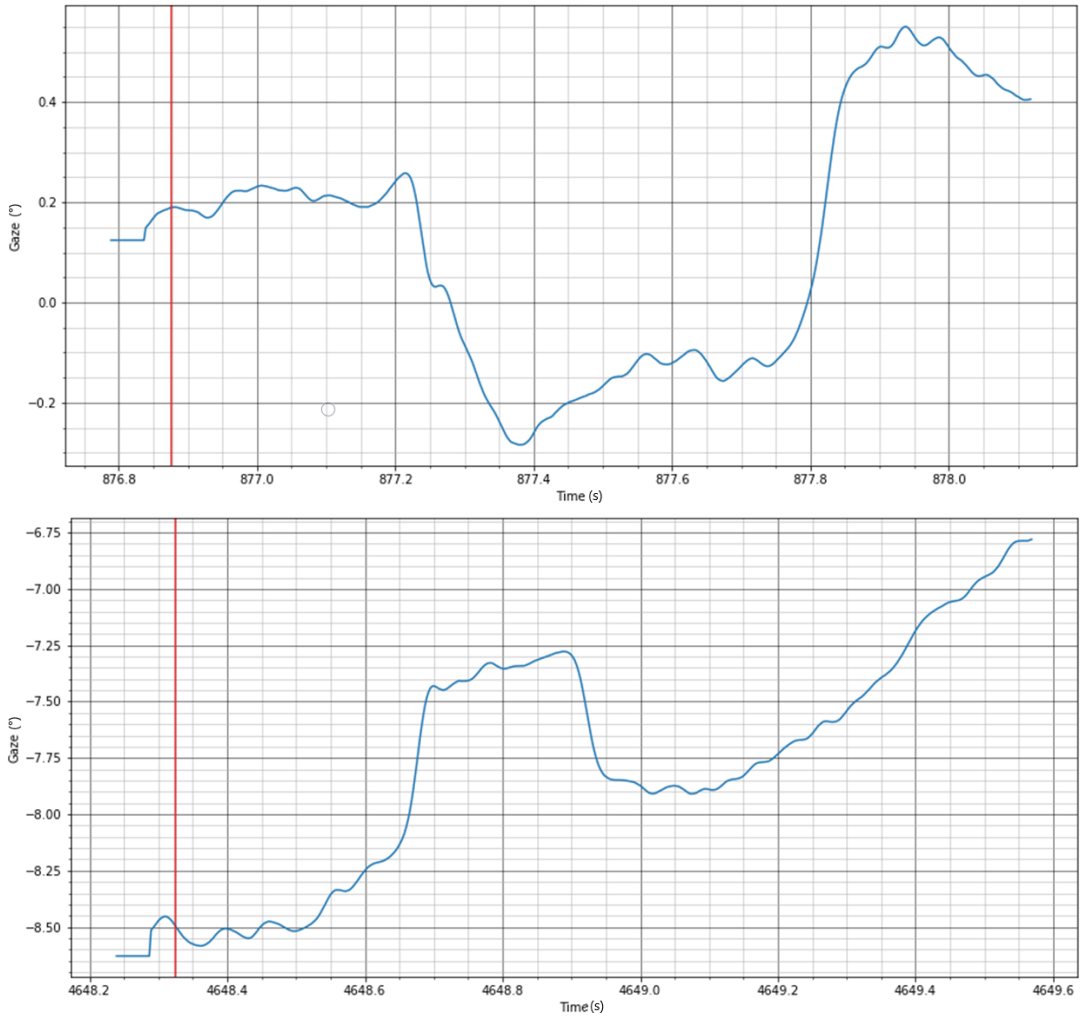
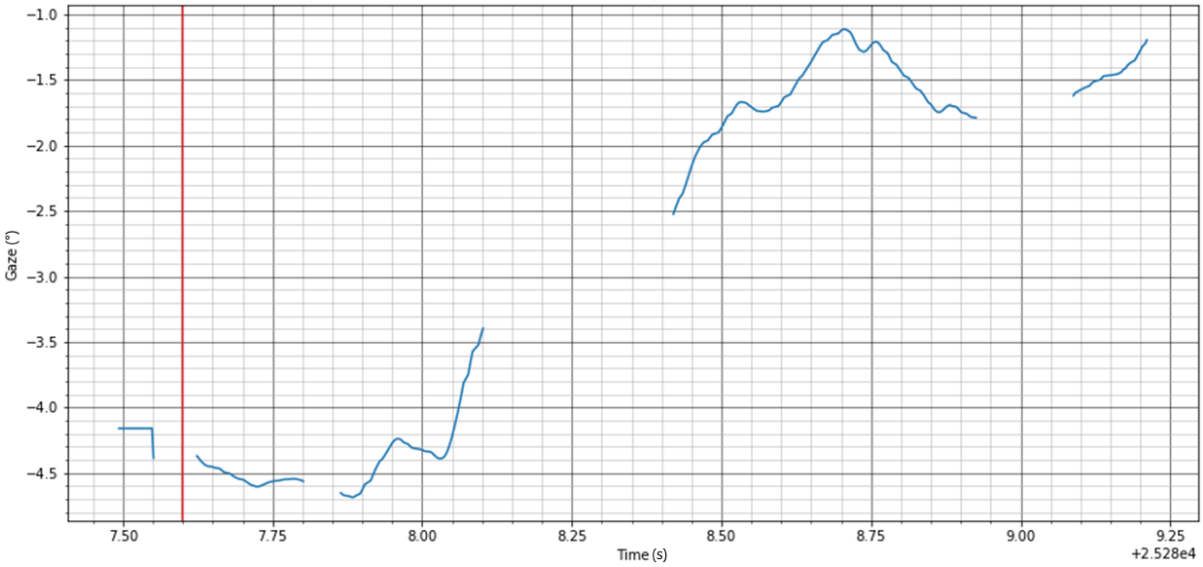


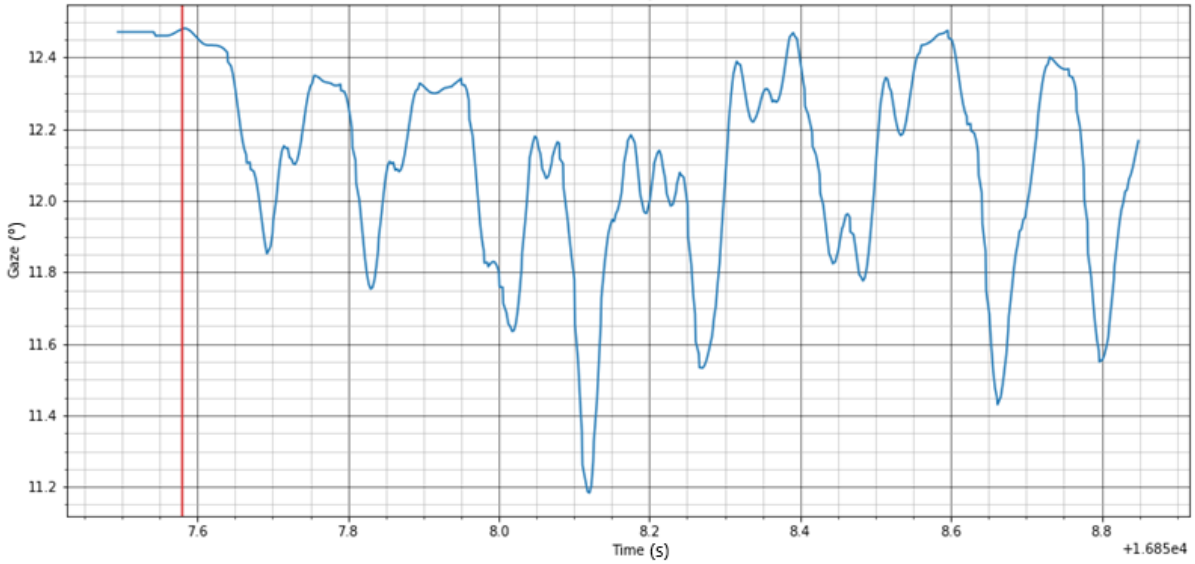
FIGURE 6.15 – Exemples de mesures de la rotation de l'œil avec un RVO et un ROC marquants et facilement identifiable

6.4.2 Données inexploitables

Bien que certaines données étaient facilement identifiables, d'autres étaient malheureusement inexploitables. Cela peut être dû au matériel, notamment avec des défaillances rendant des données corrompues lors de l'enregistrement, ou avec une mauvaise détection de la pupille lors de la mesure (cf. figure 6.16a). Des facteurs humains peuvent aussi en être la cause, notamment lorsque des participants peuvent être inattentifs ou distraits, et donc non concentrés sur la cible. Cela donne lieu à des regards très instables et rend, par conséquent, l'identification du RVO difficile (cf. figure 6.16b).



(a) Mesure lors de la perte de détection de la pupille



(b) Mesure où le participant regardait les bandes blanches (Nystagmus observable)

FIGURE 6.16 – Exemples de mesures inexploitables

Pour cette raison, nous avons choisi d'exclure de l'analyse les données de 10 participants car toutes leurs mesures n'étaient pas exploitables. De plus, parmi l'ensemble des mesures des 12 participants restants, certains passages mesurés ont eux aussi été exclus pour ces mêmes raisons (≈ 18 %). Cependant, si la mesure était exploitable mais que le RVO n'était pas identifiable, la non-présence était notée et le résultat relevé pour les caractéristiques d'angle et de durée était de 0.

6.4.3 Mesures du RVO

Premièrement, un mouvement des yeux pouvant s'assimiler à un RVO est observable sur 92,5 % des mesures exploitables. Ce mouvement est clairement identifiable (cf. figure 6.15) pour toutes les vitesses de rotation, ce malgré de légères différences. Une tendance est déjà observable, avec un pourcentage de mouvements non identifiables qui s'avère décroissant avec la vitesse de rotation (cf. figure 6.17).

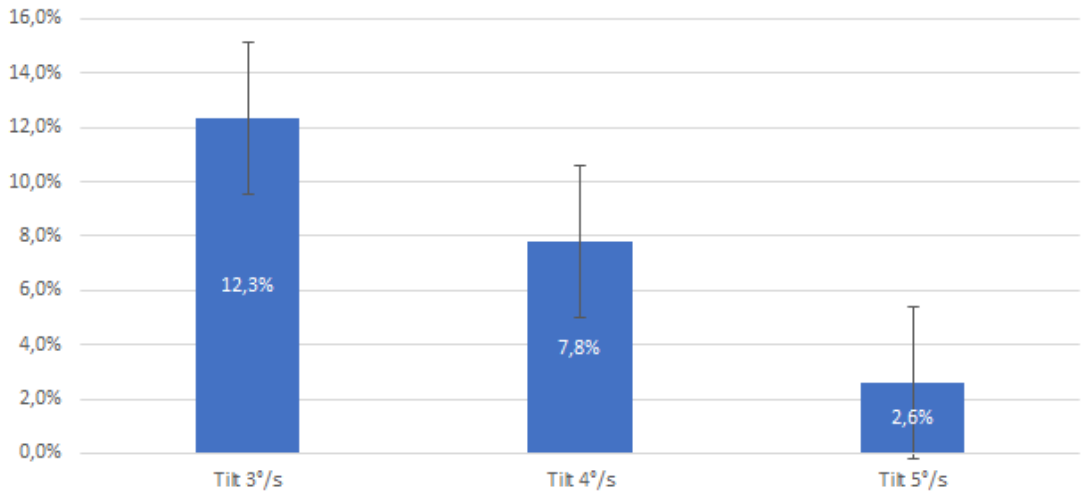


FIGURE 6.17 – Pourcentage de RVO non identifiable en fonction du MCA

À partir des mesures réalisées, nous pouvons en déduire que les caractéristiques du RVO observées se différencient en fonction de la vitesse de rotation. Aucune différence n'a été observée entre les rotations positives ou négatives, c'est pourquoi nous ne les différencierons pas ci-dessous.

Latence du RVO

La latence du RVO est approximée grâce au marqueur de synchronisation entre la simulation et la mesure, en prenant en compte la latence du système de mouvement (mesurée précédemment 5.2). Nous obtenons des latences du RVO en accord avec la littérature, comprise entre 5 et 13 ms (cf. figure 6.18) et avec une dispersion des mesures assez faible. Nous observons que la latence augmente avec la réduction de la vitesse

de rotation, allant jusqu'à une valeur légèrement supérieure à celle observée dans la littérature.

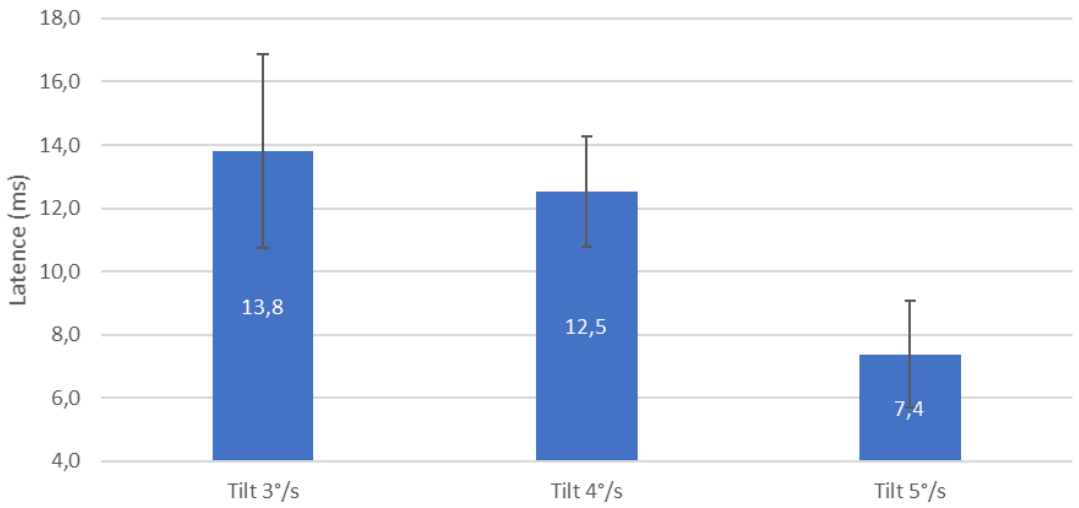


FIGURE 6.18 – Approximation de la latence du RVO en fonction du MCA

Angle du RVO

L'angle de divergence du regard par rapport à la cible est mesuré par rapport à l'angle de décalage généré par le mouvement de RVO. Cet angle est mesuré entre le début et la fin du mouvement réflexe. Les mesures sont assez cohérentes entre les participants, peu dispersées, mais beaucoup plus faibles que l'angle d'inclinaison de la cabine (cf. figure 6.19). Une légère différence est observable entre les mesures pour les différents MCA, l'angle augmentant avec la vitesse de rotation.

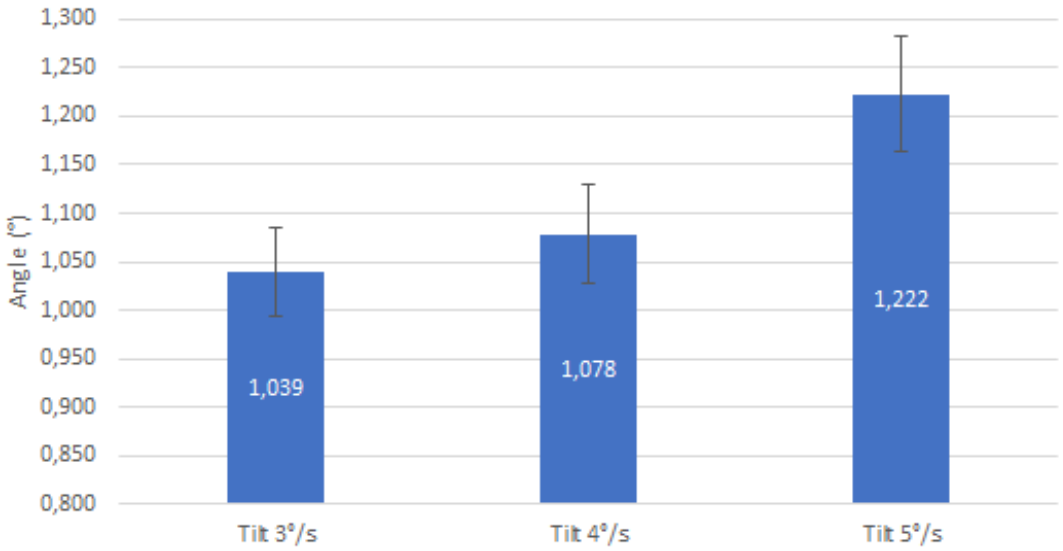


FIGURE 6.19 – Mesure de l'angle de décalage dû au RVO

Durée de la divergence de regard

La durée de la divergence du regard a elle aussi pu être mesurée. Elle correspond à la durée durant laquelle le regard est décalé par le RVO inopiné, jusqu'à son retour aux environs de sa position de fixation avant le RVO. Cette durée semble baisser très légèrement avec l'augmentation de la vitesse.

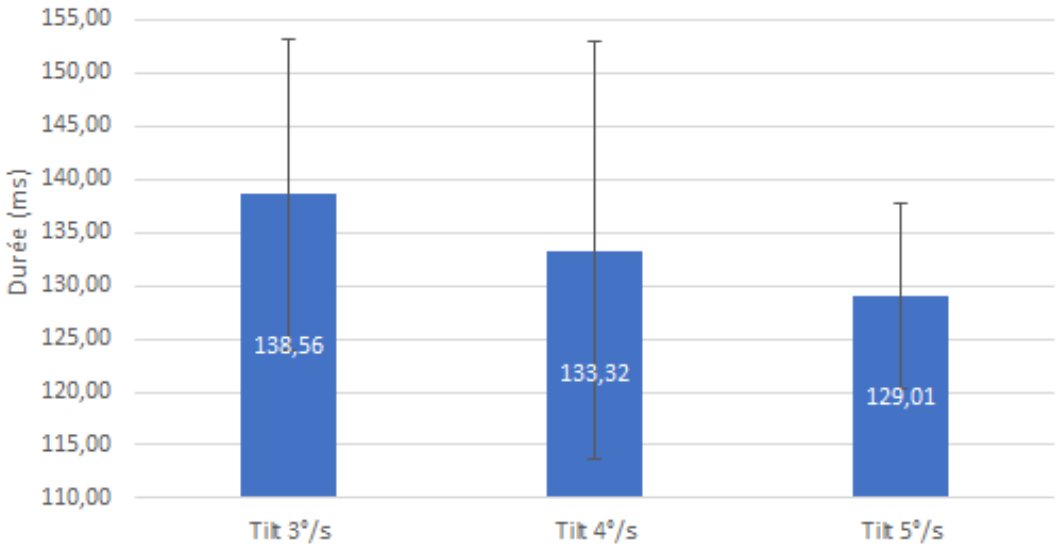


FIGURE 6.20 – Mesure de la durée du décalage du regard

6.4.4 Corrélation

Des tendances sont observables sur les différentes caractéristiques du RVO en fonction du MCA. C'est pourquoi nous avons testé si nous pouvions obtenir des corrélations entre des caractéristiques et la vitesse de rotation. Nous avons donc réalisé des tests de corrélation de Pearson avec le logiciel R. Cependant, les résultats rassemblés ci-dessous (cf. table 6.2) montrent que ces corrélations ne sont pas suffisamment significatives (p>0.01

	Angle	Latence	Durée
Qobs	1,20	-1.21	-0.935
p	0,118	0,119	0,180

TABLE 6.2 – Résultats des tests de corrélation de Pearson avec la vitesse de rotation

6.5 Discussion

Cette étude est partie de l'observation d'oscillopsies de la scène virtuelle lors d'accélérations ou de décélérations. Nous nous sommes donc penchés sur la possibilité d'un déclenchement inopiné du RVO. L'objectif de cette campagne de mesures était d'identifier le déclenchement de ce RVO afin de valider nos hypothèses. Cette étude a également permis de caractériser ce RVO déclenché pendant la simulation de conduite. La suite de cette discussion approfondira l'analyse de ces résultats d'après différents points de vue.

6.5.1 Identification du RVO

Premièrement, nous avons observé et identifié un mouvement distinctif des yeux, survenant quelques millisecondes après le début du mouvement de rotation. Ce mouvement est une rotation de l'œil dans l'axe de la rotation de la cabine, mais de sens opposé. Cette rotation est identifiable,plus ou moins clairement, sur 92,5 % des mesures exploitables. Elle possède, de plus, des caractéristiques tout à fait similaires au mouvement de RVO. Finalement, un mouvement de correction est observable peu après ce décalage visuel, pouvant s'assimiler à un ROC, mouvement réflexe de correction du glissement rétinien. C'est pourquoi nous pensons que l'hypothèse du déclenchement du RVO avec la rotation de la cabine est juste.

Ce mouvement caractéristique est, de plus, observable pour toutes les vitesses de rotation, même s'il est moins souvent détectable pour des vitesses faibles. Cela vient conforter notre hypothèse selon laquelle le RVO est quand même déclenché sous les seuils de perception des rotations en simulation. En effet, les vitesses de rotation étaient supérieures au seuil de détection des CSC [Guedry 1974], semblant avoir déclenché ces RVO malgré la non-perception des rotations par les participants. À ce titre, par retour verbal, la plupart des participants indiquent ne pas avoir perçu les rotations, confirmant les résultats de COLOMBET et al. [2015].

Le décalage visuel engendré par le déclenchement inopiné de ce RVO est assez remarquable. En effet, nous pouvons observer (par exemple figure 6.15) le décalage du regard par rapport à sa fixation initiale qui est ensuite corrigée, mais ce décalage de quelques degrés est tout de même maintenu un peu plus de 26 ms avant d'être corrigé. Ce décalage du point de fixation du regard risque alors de déclencher une adaptation des caractéristiques du RVO. Celles-ci ne sont, en effet, pas adaptées à la situation, et ne permettent donc pas de maintenir la fixation du regard dans ces conditions.

6.5.2 Caractéristiques du RVO

Les mesures de la latence du RVO sont cohérentes avec les mesures de la littérature, dans le noir (5 à 13 ms [Angelaki 2009]). Cependant, les mesures collectées pour des vitesses d'inclinaisons de $3\,^{\circ}\,\mathrm{s}^{-1}$ montrent une latence légèrement plus élevée que dans la littérature. Cette augmentation de la latence est sans doute liée à l'activité et à la stimulation mentale qui sont plus élevées en simulation de conduite que lors de mesures dans le noir. Ce décalage peut aussi s'expliquer par un manque de précision de la méthode de synchronisation. Celle-ci dépend en effet des latences du réseau, du PC d'acquisition, du système d'acquisition et du système de mouvement. L'approximation de ces latences a été prise en compte dans la mesure, bien que celles-ci puissent varier et influer la mesure, surtout pour des mesures du même ordre de grandeur.

La durée du décalage avant correction avec le ROC est elle aussi cohérente avec la littérature : 100 à 130 ms après le glissement rétinien [D. A. Robinson 2011]. De même que pour le RVO, des mesures de latences un peu plus grandes sont observées, pouvant s'expliquer par l'activité mentale et les stimulations sensorielles plus importantes lors de la simulation de conduite que devant des motifs en mouvement.

En ce qui concerne l'inclinaison de la cabine, nous avions choisi l'angle maximal possible, soit 6°. Néanmoins, l'amplitude du RVO observé est beaucoup plus faible ($\approx 1°$), bien que ce dernier cherche à compenser ce mouvement de rotation. Ce phénomène peut en partie s'expliquer par la distance assez proche de la cible qui pourrait réduire donc le gain du RVO. Même si le véhicule virtuel est placé à 100m, la distance d'accomodation et de vergence sur l'écran n'est que de 1.9m (rayon de l'écran cylindrique d'Ultimate). Néanmoins, au vu de l'importante différence entre ces deux angles, cette explication ne peut en être la cause principale. Nous avançons dès lors l'idée que cet écart s'explique par l'amortissement du mouvement de rotation de la tête. En effet, lors de la simulation de conduite, la tête et le cou sont libres et la rotation est effectuée par la cabine, et non pas directement par la tête. Ainsi, par effet d'inertie, la tête tend à rester dans son orientation en fonction de la tension musculaire dans le cou. Ce phénomène réduit ainsi l'amplitude du mouvement de rotation de la tête, et donc celle de la correction du RVO.

L'amortissement du mouvement de la tête est sans doute lui aussi à l'origine de cet écart de latence par rapport à ce qu'avance la littérature. En effet, celui-ci peut retarder le mouvement de la tête par rapport à celui de la cabine, justifiant une latence mesurée légèrement plus grande. L'amortissement de la tête réduit également la vitesse de rotation des CSC, expliquant pourquoi le RVO n'est pas toujours déclenché malgré une vitesse de rotation supérieure au seuil de détection des CSC. Plus particulièrement, cela expliquerait l'augmentation du taux de RVO non observé avec la diminution de la vitesse.

6.5.3 RVO et cinétoses

Comme précédemment mentionné, les algorithmes de contrôle peuvent déclencher des RVO par la restitution des accélérations avec des techniques de « tilt coordination ». En effet, même si le système vestibulaire possède une ambiguïté de perception entre l'inclinaison et une accélération constante, celui-ci capte les informations des mouvements de rotation. Ainsi, cette ambiguïté est utile en simulation afin de simuler des accélérations continues. Cependant, lors des phases de changement d'accélération (« jerk »), le mouvement de rotation amenant jusqu'à l'inclinaison désirée peut être critique. De la sorte, comme supposé dans nos hypothèses, ces observations d'oscillopsies sont liées à un déclenchement inopiné du RVO lors des phases de rotations.

Ces oscillopsies, mouvements apparents de la scène visuelle, démontrent un glissement rétinien [WIST et al. 1983]. En effet, ce glissement de l'image sur la rétine est facilement observable sur nos mesures par le décalage de l'œil par rapport à son point de fixation (cf. figure 6.15). Ce glissement rétinien peut être source de cinétoses, surtout dans notre cas où il entre en conflit avec les mouvements perçus, induisant une perception fausse et indésirée d'une route mouvante. Cette perception faussée perturbe les conducteurs qui vont, par ailleurs, essayer de limiter les forts changements d'accélérations. Cette perception de route oscillante peut aussi amplifier ou créer les conflits neurosensoriels lors de la conduite simulée, augmentant par la même occasion les symptômes de cinétoses.

Le déclenchement inopiné du RVO, ainsi que le glissement rétinien résultant, amènent à une adaptation des caractéristiques du RVO afin de palier à ce défaut visuel. Par ailleurs, les oscillopsies sont le signe de RVO inopinés ainsi que d'une adaptation de ses caractéristiques [E. Viirre et al. 1998 ; Sanderson et al. 2007 ; Straube et al. 2012]. De surcroit, d'après certaines théories [M. H. Draper 1996 ; Ebenholtz et al. 1994 ; Dg 1987], l'adaptation et le déclenchement inopiné du RVO peuvent être sources de cinétoses. Même si cette théorie n'est pas encore validée (tout comme l'ensemble des théories sur le sujet), celle-ci exprime un lien avec le RVO qui semble confirmé par la littérature. En dehors de cette théorie, l'adaptation, même si elle ne génère pas directement de symptômes, peut augmenter la charge cognitive, voire la surcharger et perturber l'adaptation neurosensorielle en cours [J. Reason et Brand 1975]. Cette adaptation du RVO est, de plus, elle aussi une adaptation neurosensorielle visuo-vestibulaire. Le déclenchement inopiné et l'adaptation du RVO, de par leurs natures, peuvent sans doute augmenter des symptômes tels que vison floue, migraine ophtalmique, ou encore difficulté à faire le focus [E. Viirre et al. 1998 ; Demer et al. 1989 ; Jeong et al. 2010]. Ces symptomes peuvent, de plus, être confondus avec ceux du mal du simulateur et donc augmenter le malaise des conducteurs ainsi que leurs scores de SSQ.

6.5.4 Remarques générales

Tout comme les yeux, la tête dispose également de réflexes servant à maintenir son orientation : les réflexes vestibulo-spinal (RVS), et plus particulièrement le réflexe vestibulo-nucal (RVN). Ces réflexes permettent aussi une conservation du regard dans le cas de mouvements de rotation du corps. Néanmoins, dans le cas de la simulation de conduite où la tête et le cou sont laissés libres, ces réflexes peuvent intervenir et ainsi altérer la mesure.

La campagne de mesure étant assez répétitive et présentant peu d'intérêt pour les participants, nous émettons l'hypothèse d'une certaine lassitude de leur part. En effet, maintenir le regard fixe pendant plusieurs minutes peut se révéler fatigant, par conséquent les participants peuvent être tentés de regarder ailleurs. C'est pourquoi nous leur proposions de courtes pauses entre les changements de MCA, bien que cela n'empêche pas une baisse d'attention au fur et à mesure des conduites, réduisant quelque peu la fiabilité des mesures.

Afin de générer les vitesses de rotation désirées et d'assurer une répétabilité des scénarios entre les participants, le véhicule était en mode autonome. Ce mode de conduite permet de décharger le conducteur de la tâche de conduite, réduisant ainsi grandement sa charge cognitive. Cependant, comme évoqué précédemment (cf. 6.1), la charge cognitive des sujets peut avoir une influence notable sur le RVO. Par conséquent, dans le cas de la conduite manuelle, le RVO peut être moins présent, déclenchant moins d'adaptations et sans doute moins de mal du simulateur. De plus, notre scénario de mesure était volontairement simple et visuellement vide afin d'éviter des distractions et de permettre aux participants de concentrer leur regard. Cependant, dans le cas de scénarios plus réalistes, les stimulations visuelles seront plus grandes pouvant augmenter la charge cognitive.

6.6 Conclusion

La présente étude s'est penchée sur l'étude d'un défaut visuel engendré par le contrôle du simulateur. Ce défaut, en plus de générer des oscillopsies, pourrait être un facteur potentiel du mal du simulateur par l'adaptation du RVO. En effet, d'après certaines théories assez récentes et encore non validées, ce phénomène pourrait intervenir dans la génèse du mal du simulateur, particulièrement dans le cas de la simulation de conduite. Nos résultats montrent, en effet, que des RVO peuvent être déclenchés inopinément à cause de l'utilisation d'algorithmes de contrôle de simulation d'accélération par inclinaison. Cette étude démontre également que ces RVO peuvent être déclenchés même sous les seuils de perception des vitesses de rotation en simulation. Contrairement aux mesures du RVO réalisées en laboratoire, cette étude a, de plus, permis une caractérisation de ce réflexe dans le contexte de la simulation de conduite où les stimulations sensorielles sont plus nombreuses et complexes.

Cette étude remet en question l'utilisation des algorithmes de « tilt coordination ». En effet, sans l'utilisation de rails, les vitesses de rotation pour la simulation de conduite sont alors assez élevées et dépassent souvent les seuils de perception des rotations en simulation. Dès lors, le conducteur peut, d'une part, percevoir des rotations pouvant le gêner et perturber sa perception du mouvement. D'autre part, cela risque de déclencher des RVO inopinés, créant des oscillopsies pouvant elles aussi perturber ces perceptions. Ces oscillopsies sont signes de glissements rétiniens, pouvant déclencher une adaptation des caractéristiques du RVO et augmenter sans doute le mal du simulateur.

Quant aux algorithmes de « tilt coordination », la présence de rails réduit la vitesse d'inclinaison de la cabine, permettant ainsi de passer sous les seuils de perception des conducteurs. Néanmoins, cette étude montre que des RVO peuvent être déclenchés tout en étant sous ces seuils, pouvant ainsi générer le mal du simulateur. Pour éviter cela, il faudrait passer sous le seuil de perception de CSC. Cependant, la capacité de restitution des rails dépend de leur qualité d'actionneurs ainsi que de leurs longueurs. C'est pourquoi cette étude démontre l'intérêt de disposer de rails de meilleure qualité et d'une plus grande longueur afin de permettre de meilleures restitutions dynamiques tout en restant sous les seuils de perceptions. L'ensemble de ces éléments poursuit l'objectif de maintenir l'illusion de la simulation et de réduire le mal du simulateur.

Pour finir, nous supposions, au début de notre étude, que l'analyse et la caractérisation du décalage engendré par le déclenchement du RVO pourraient nous permettre de réaliser des corrections visuelles afin de réduire le mal du simulateur engendré par ce décalage. Nous avions pour ambition de proposer une correction visuelle afin de compenser le décalage visuel engendré par le déclenchement du RVO, et limiter ainsi le glissement rétinien. Actuellement, cette correction nous parait toutefois compliquée et difficilement réalisable, voire non fonctionnelle. En effet, les mécanismes du RVO sont assez complexes, présentant des caractéristiques variables suivant les situations (fixation du regard, activité mentale) et les sujets.

Pour de futures expérimentations, il serait intéressant d'étudier le lien entre les ca-

ractéristiques du RVO en simulation et les scores de mal du simulateur.

CHAPITRE 7

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce dernier chapitre vient conclure l'ensemble des travaux relatifs à cette thèse. Nous allons, dans un premier temps, présenter une synthèse des résultats obtenus, puis exposer leurs actuelles applications et celles envisageables à l'avenir.

7.1 Synthèse et discussion

Dans le contexte de la validation du véhicule autonome, la simulation de conduite DIL est un élément important afin d'assurer la sécurité et le bon fonctionnement des systèmes, et ce particulièrement pour les phases de contrôle partagées. Cependant, la simulation DIL présente un inconvénient : le mal du simulateur. Ce dernier peut, en raison de symptômes désagréables, perturber le conducteur et limiter le temps de simulation, éléments particulièrement essentiels pour la validation du véhicule autonome. Ce travail de thèse s'inscrivant dans ce contexte spécifique, il avait donc pour objectif de mieux comprendre les facteurs pouvant influer sur ce phénomène. De plus, ce travail de recherche avait également pour but de proposer des solutions de réduction du mal du simulateur applicables aux simulateurs de conduite immersifs.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux effets de l'ajout de vibrations au niveau du corps, en expérimentant deux types de vibrations. Nos expérimentations ont montré un effet prophylactique de l'ajout de ces modalités sensorielles en simulation de conduite. Premièrement, l'ajout de vibrations perturbatrices a réussi à tromper les conflits sensoriels en venant ajouter un bruit sur les perceptions proprioceptives, kinesthésiques et vestibulaires, tout en servant de distracteur mental. Deuxièmement, les vibrations réalistes et cohérentes avec la simulation se sont montrées légèrement plus efficaces en fournissant un ressenti proprioceptif kinesthésique ainsi qu'un schéma sensoriel plus proches de la réalité. Ces résultats, en plus de fournir une meilleure immersion, démontrent l'utilité d'ajouter des systèmes vibratoires dans les simulateurs.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes concentrés sur la compensation de l'écart de latence du simulateur Ultimate. En effet, l'écart entre le rendu visuel et le rendu dynamique étant assez important, il pouvait être source de conflits visio-vestibulaire. À ce titre, les essais portant sur la compensation de latences ont montré une nette amélioration du mal du simulateur. Même si cette solution gagne à être améliorée, par exemple en fonction des fréquences d'utilisation, celle-ci témoigne de l'intérêt de limiter les écarts visio-vestibulaire en simulation. Cette solution est, par ailleurs, simple à mettre en place et transparente dans le cas de la conduite autonome.

Finalement, avec notre compréhension du mal du simulateur grandissante, nous nous sommes focalisés sur un potentiel facteur du mal du simulateur : l'adaptation du réflexe vestibulo-oculaire. En effet, certaines théories et études montrent que les situations cinétogènes induisent une adaptation du RVO, déclenchant des symptômes de cinétoses. Notre campagne de mesure a confirmé nos hypothèses sur le déclenchement inopiné du RVO en raison des techniques de rendu d'accélération par inclinaison. Cette expérience montre que le déclenchement inopiné du RVO peut intervenir même sous les seuils de perception de rotation. De plus, en mettant en évidence le décalage visuel engendré pour le conducteur, cette campagne de mesure nous a permis de caractériser ce RVO en simulation, et ainsi de mieux comprendre ce potentiel facteur du mal du simulateur.

Au vu de l'ensemble des résultats et de leurs limites, le mal du simulateur reste un effet secondaire de la simulation DIL encore assez méconnu et complexe à supprimer. En effet, même si les cinétoses sont étudiées depuis longtemps, plusieurs théories s'opposent quant à l'explication de ce phénomène. Cependant, dans le cas du mal du simulateur, celui-ci semble en majeure partie dû à l'effet de l'ensemble des défauts, aussi minimes soient-ils, de la simulation par rapport au réel. Ce travail de thèse constitue ainsi une étape supplémentaire dans l'étude des cinétoses en se concentrant sur les besoins spécifiques de la simulation de conduite et de la validation du véhicule autonome. Au regard de ces objectifs, ce travail de thèse s'est principalement concentré sur la proposition de solutions techniques dans le cadre des possibilités des simulateurs à disposition et de la simulation de conduite chez Renault. Ce travail a, de plus, été essentiellement dédié à des études en véhicule autonome facilitant ainsi leur déroulement en raison de sa répétabilité. Pour finir, la dernière étude s'est portée sur un potentiel déclenchement de réflexes oculaires inopinés, pouvant sans doute induire du mal du simulateur. L'objectif était de pouvoir l'identifier afin de pouvoir le corriger par la suite, cela n'a malheureusement pas pu être réalisé durant ces travaux de thèse.

7.2 Applications et perspectives

Cette thèse, de par ses objectifs, avait un but pratique avec des applications concrètes pour la simulation de conduite chez Renault. Ainsi, les deux premières études se sont concentrées directement sur des solutions qui ont pu être testées et appliquées sur les simulateurs Renault. En revanche, la dernière étude n'a, quant à elle, pas été centrée sur la recherche d'une solution directe, mais elle a permis d'identifier et d'analyser un défaut de simulation. Ce défaut, facteur potentiel du mal du simulateur, peut faire l'objet de diverses applications afin de le corriger, l'éviter ou le compenser.

Tout d'abord, notre première étude sur les effets de l'ajout de modalités vibratoires en simulation confirme l'intérêt des plateformes vibratoires. Par conséquent, cela a pu nous conforter dans l'utilisation de solution vibratoire sur le simulateur Ultimate, ainsi que de confirmer le choix de l'installation de vérins pour les vibrations dans les nouveaux simulateurs Renault, Helios et ROADS. Les applications de cette étude ne sont pas limitées aux seuls simulateurs Renault, mais sont également valables pour tout autre simulateur pour lequel une solution d'augmentation du réalisme et de la perception est recherchée, et ce tout en réduisant le mal du simulateur. Cette étude poursuit également les recherches sur l'effet de modalités vibratoires sur les cinétoses. En effet, elle démontre que les vibrations du corps entier peuvent avoir deux effets : soit, premièrement, en améliorant la perception de la vitesse et des accélérations avec une perception kinesthésique de ceux-ci ; soit, deuxièmement, en perturbant les sens et la perception de la vitesse, venant ainsi surpasser les conflits sensoriels. La compréhension de l'effet des vibrations peut être développée davantage, notamment par des études plus approfondies sur des vibrations perturbatrices, ou encore des vibrations spatialisées permettant, par exemple, le ressenti du mouvement ou des virages par les conducteurs.

Deuxièmement, notre étude sur les latences apporte une solution directement appliquée sur le simulateur Ultimate. Cette solution de la compensation de l'écart de latence est aujourd'hui utilisée pour les simulations en véhicule autonome, elle apporte à l'utilisateur un confort de conduite tout en lui étant imperceptible. Cette solution, si elle ne perturbe pas trop les participants, peut également être appliquée au cas de la simulation de conduite en mode manuel ou dans le cadre de l'expérience en cours. Enfin, elle peut aussi être déployée sur d'autres simulateurs tout en étant adaptée afin de tenir compte de leurs propres caractéristiques de latences. Cette étude renforce, de plus, l'importance des latences faibles et synchrones dans les simulateurs. Des perspectives d'évolution peuvent être envisagées, notamment en caractérisant complètement les latences sur toute la gamme de fréquences, et ce pour chaque composant de restitution (visuel, dynamique, sonore, etc.). L'objectif serait alors de créer une synchronisation complète de l'ensemble sur toute la gamme de fréquences d'utilisation.

Notre dernière étude, à la différence des deux précédentes n'a pas été axée sur une solution de réduction du mal du simulateur, mais sur l'étude d'un potentiel facteur aggravant. Cette étude ne fournit donc pas d'application directe sur les simulateurs Renault, mais elle justifie en revanche la tendance des systèmes de restitutions dynamiques à être plus grands et plus performants, comme pour le futur simulateur ROADS. Néanmoins,

cette étude plus fondamentale ouvre plusieurs perspectives pour la recherche sur le mal du simulateur en démontrant le déclenchement du RVO sous les seuils de perception. Elle introduit également des perspectives d'applications, comme l'amélioration des algorithmes de contrôles, visant à limiter le déclenchement du RVO et, par conséquent, son adaptation.

BIBLIOGRAPHIE

Adachi, T. et al. (2014). *Simulator Motion Sickness Evaluation Based on Eye Mark Recording during Vestibulo-Ocular Reflex*. SAE Technical Paper 2014-01-0441. Warrendale, PA : SAE International.

Adelstein, B. D. et al. (2003). « Head tracking latency in virtual environments : psychophysics and a model ». In : *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. T. 47. 20. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, p. 2083-2087.

Allison, R. S. et al. (2001). « Tolerance of temporal delay in virtual environments ». In : *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*. IEEE, p. 247-254.

Andersen, G. J. et M. L. Braunstein (1985). « Induced self-motion in central vision. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 11.2, p. 122.

Angelaki, D. E. (2009). « Vestibulo-Ocular Reflex ». In : *Encyclopedia of Neuroscience*. Sous la dir. de L. R. Squire. Oxford : Academic Press, p. 139-146.

Angelaki, D. E. et T. A. Yakusheva (2009). « How Vestibular Neurons Solve the Tilt/Translation Ambiguity ». In : *Annals of the New York Academy of Sciences* 1164, p. 19-28.

Balaban, C. D. (1999). « Vestibular autonomic regulation (including motion sickness and the mechanism of vomiting) ». In : *Current opinion in neurology* 12.1, p. 29-33.

Balk, S. et al. (2013). « Simulator Sickness Questionnaire : Twenty Years Later ». In : *Driving Assessment Conference*, p. 257-263.

Baltzley, D. R. et al. (1989). « The time course of postflight simulator sickness symptoms. » In : *Aviation, space, and environmental medicine* 60.11, p. 1043-1048.

Barrett, G. V. et C. L. Thornton (1968). « Relationship between perceptual style and simulator sickness. » In : *Journal of Applied Psychology* 52.4, p. 304.

Barrett, G. V., C. L. Thornton et P. A. Cabe (1970). « Cue conflict related to perceptual style. » In : *Journal of Applied Psychology* 54.3, p. 258.

Bear, M. F. et al. (2002). *Neurosciences : à la découverte du cerveau*. Pradel Editions. 898 p.

Benson, A. J. (2002). « Motion sickness ». In : *Medical aspects of harsh environments*. Sous la dir. de K. B. Pandof et R. E. Burr. T. vol 2. Chap 35, p 1048-1083.

Berthoz, A., B. Pavard et al. (1975). « Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection) basic characteristics and visual-vestibular interactions ». In : *Experimental brain research* 23.5, p. 471-489.

Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob.

Berthoz, A. et J. Droulez (1982). « Linear self motion perception ». In : *Tutorials on motion perception*. Springer, p. 157-199.

Berthoz, A., I. Israel et al. (1995). « Spatial memory of body linear displacement : what is being stored ? » In : *Science* 269.5220, p. 95-98.

Bertin, D. R. J. V. et al. (2004). « Objective measurement of simulator sickness and the role of visual-vestibular conflict situations : a study with vestibular-loss (a-reflexive) subjects ». In : t. 30. Society for Neurosciences.

Bertolucci, L. E. et B. DiDario (1995). « Efficacy of a portable acustimulation device in controlling seasickness ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 66.12, p. 1155-1158.

Biocca, F. (1992). « Will simulation sickness slow down the diffusion of virtual environment technology ? » In : *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 1.3, p. 334-343.

Birren, J. E. et M. B. Fisher (1947). « Susceptibility to seasickness : a questionnaire approach. » In : *Journal of Applied Psychology* 31.3, p. 288.

Bles, W. et al. (1998). « Motion sickness : only one provocative conflict ? » In : *Brain Research Bulletin* 47.5, p. 481-487.

Boff, K. R. et J. E. Lincoln (1988). *Engineering data compendium : Human perception and performance*. T. 2. Harry G. Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory.

Bogaerts, A. et al. (2007). « Effects of whole body vibration training on postural control in older individuals : a 1 year randomized controlled trial. » In : *Gait & posture* 26.2, p. 309-316.

Bonato, F. et A. Bubka (2006). « Chromaticity, spatial complexity, and self-motion perception ». In : *Perception* 35.1, p. 53-64.

Bonato, F., A. Bubka et L. Alfieri (2004). « Display color affects motion sickness symptoms in an optokinetic drum ». In : *Aviation, space, and environmental medicine* 75.4, p. 306-311.

Borah, J. et al. (1979). *Sensory Mechanism Modeling*. Department of Defense, Air Force Human Resources Laboratory. 2 p.

Bos, J. E. et al. (2002). « Eye movements to yaw, pitch, and roll about vertical and horizontal axes : adaptation and motion sickness ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 73.5, p. 436-444.

Bos, J. et W. Bles (1998). « Modelling motion sickness and subjective vertical mismatch detailed for vertical motions ». In : *Brain Research Bulletin* 47.5, p. 537-542.

Bos, J. E. (2011). « Nuancing the relationship between motion sickness and postural stability ». In : *Displays* 32.4, p. 189-193.

Bos, Jelte E. (2015). « Less sickness with more motion and/or mental distraction ». In : *Journal of Vestibular Research* 1, p. 23-33.

Bouchard, S. et al. (2007). « Revising the factor structure of the Simulator Sickness Questionnaire ». In : *Annual review of cybertherapy and telemedicine* 5 (Summer), p. 128-137.

Bouvier, P. (2009). « La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur ». Thèse de doct.

Bringoux, L. et al. (2002). « Perception of slow pitch and roll body tilts in bilateral labyrinthine-defective subjects ». In : *Neuropsychologia* 40.4, p. 367-372.

Brooks, F. P. (1999). « What's real about virtual reality ? » In : *IEEE Computer graphics and applications* 19.6, p. 16-27.

Bruce, D. G. et al. (1990). « Acupressure and motion sickness ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 61.4, p. 361-365.

Campbell, C. et W. Heckel (2000). « Headset for vestibular stimulation in virtual environments ». Brev. amér. 6077237A. A. Inc.

Cannon, S. C. et al. (1985). « The effect of the rotational magnification of corrective spectacles on the quantitative evaluation of the VOR ». In : *Acta Oto-Laryngologica* 100.1, p. 81-88.

Carcaud, J. et al. (2017). « Long-Lasting Visuo-Vestibular Mismatch in Freely-Behaving Mice Reduces the Vestibulo-Ocular Reflex and Leads to Neural Changes in the Direct Vestibular Pathway ». In : *eNeuro* 4.1.

Casali, J. G. et L. H. Frank (1986). « Perceptual distortion and its consequences in vehicular simulation : Basic theory and incidence of simulator sickness ». In : *Transportation Research Record* 1059, p. 57-65.

Casali, J. G. et W. W. Wierwille (1986). « Potential design etiological factors of simulator sickness and a research simulator specification ». In : *Transportation Research Record* 1059, p. 66-74.

Casali, J. G. (1985). *Vehicular Simulation-Induced Sickness. Volume 1. An Overview.* IEOR-8501. Virginia polytechnic inst and state univ.

Chen, J. Y. et al. (2010). *Effectiveness of stereoscopic displays for indirect-vision driving and robot teleoperation.* Rapp. tech. Army research lab Aberdeen proving ground MD.

Chiari, L. et al. (2002). « Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement ». In : *Clinical biomechanics* 17.9-10, p. 666-677.

Choukèr, A. et al. (2010). « Motion sickness, stress and the endocannabinoid system ». In : *PloS One* 5.5, e10752.

Cobb, S. V. (1999). « Measurement of postural stability before and after immersion in a virtual environment ». In : *Applied Ergonomics* 30.1, p. 47-57.

Cohen, B. et al. (2003). « The critical role of velocity storage in production of motion sickness ». In : *Annals of the New York Academy of Sciences* 1004, p. 359-376.

COLOMBET, F. et al. (2015). « Pitch tilt rendering for an 8-DOF driving simulator ». In : *Proceding of Driving Simulation Conference 2015 Europe VR.* DSC 2015. Tübingen, Germany, p. 55-61.

Cowings, P. S. (1990). *Autogenic-feedback training-A treatment for motion and space sickness.* Rapp. tech.

Cowings, P. S. (1999). *Effects of command and control vehicle (C2V) operational environment on soldier health and performance.* Army research lab aberdeen proving ground md.

Crampton, G. H. (1990). *Motion and Space Sickness.* CRC Press. 464 p.

Craske, B. (1977). « Perception of impossible limb positions induced by tendon vibration ». In : *Science* 196.4285, p. 71-73.

Crowley, J. S. (1987). « Simulator sickness : a problem for Army aviation ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 58.4, p. 355-357.

Cullen, K. E. (2012). « The vestibular system : multimodal integration and encoding of self-motion for motor control ». In : *Trends in neurosciences* 35.3, p. 185-196.

Cutting, J. E. et P. M. Vishton (1995). « Perceiving layout and knowing distances : The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth ». In : *Perception of space and motion*. Elsevier, p. 69-117.

D'Amour, S. et al. (2017). « The efficacy of airflow and seat vibration on reducing visually induced motion sickness ». In : *Experimental Brain Research* 235.9, p. 2811-2820.

Dai, M. et al. (2007). « Labyrinthine lesions and motion sickness susceptibility ». In : *Experimental Brain Research* 178.4, p. 477-487.

Dai, M. et al. (2011). « Prolonged reduction of motion sickness sensitivity by visual-vestibular interaction ». In : *Experimental Brain Research* 210.3, p. 503-513.

De Graaf, B. et al. (1998). « Roll motion stimuli : sensory conflict, perceptual weighting and motion sickness ». In : *Brain Research Bulletin* 47.5, p. 489-495.

DeFlorio, P. T. et R. Silbergleit (2006). « Mal de Debarquement presenting in the Emergency Department ». In : *The Journal of emergency medicine* 31.4, p. 377-379.

Demer, J. L. et al. (1989). « Adaptation to telescopic spectacles : vestibulo-ocular reflex plasticity. » In : *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 30.1, p. 159-170.

Denton, G. (1966). « 'Moving road simulator'-A machine suitable for the study of speed phenomena including motion after-effect ». In : *Ergonomics*.

Dg, W. (1987). « The vestibulo-ocular reflex and its possible roles in space motion sickness. » In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 58.9, A170-4.

Dichgans, J. et T. Brandt (1978). « Visual-vestibular interaction : Effects on self-motion perception and postural control ». In : *Perception*. Springer, p. 755-804.

Diels, C. (2014). « Will autonomous vehicles make us sick ». In : *Contemporary Ergonomics and Human Factors 2014 : Proceedings of the international conference on Ergonomics & Human Factors 2014, Southampton, UK, 7-10 April 2014*. Sous la dir. de S. Sharples et S. Shorrock. CRC Press, p. 301-307.

Dizio, P. et J. R. Lackner (1992). « Influence of gravitoinertial force level on vestibular and visual velocity storage in yaw and pitch ». In : *Vision research* 32.1, p. 111-120.

Dong, X. et al. (2011). « Control of a virtual vehicle influences postural activity and motion sickness. » In : *Journal of Experimental Psychology : Applied* 17.2, p. 128-138.

Draper, M. (1998). « The Adaptive Effects Of Virtual Interfaces : Vestibulo-Ocular Reflex and Simulator Sickness. » Thèse de doct.

Draper, M. H. (1996). « Can your eyes make you sick ? Investigating the relationship between the vestibulo-ocular reflex and virtual reality ». In : *Human Interface Technology Laboratory Technical Report*.

Draper, M. H. et al. (2001). « Effects of Image Scale and System Time Delay on Simulator Sickness within Head-Coupled Virtual Environments ». In : *Human Factors* 43.1, p. 129-146.

Drosdol, J., W. Käding et al. (1986). « The Daimler-Benz Driving Simulator New Technologies Demand New Instruments ». In : *Vehicle System Dynamics* 15.sup1, p. 44-57.

Drosdol, J. et F. Panik (1985). « The Daimler-Benz driving simulator a tool for vehicle development ». In : *SAE Transactions*, p. 981-997.

Droulez, J. et C. Darlot (2018). « The Geometric and Dynamic Implications of the Coherence Constraints in Three-Dimensional Sensorimotor Interactions ». In : p. 495-526.

Duh, H. B.-L., H. Abi-Rached et al. (2001). « Effects on balance disturbance of manipulating depth of an independent visual background in a stereographic display ». In : *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*. T. 45. 27. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, p. 1882-1885.

Duh, H. B.-L., D. E. Parker et al. (2001). « An "independent visual background" reduced balance disturbance envoked by visual scene motion : implication for alleviating simulator sickness ». In : *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, p. 85-89.

Duh, H. B.-L., D. E. Parker et al. (2004). « An independent visual background reduced simulator sickness in a driving simulator ». In : *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 13.5, p. 578-588.

Durlach, N. I. et A. S. Mavor (1995). *Virtual reality : scientific and technological challenges*.

Ebenholtz, S. M. et al. (1994). « The possible role of nystagmus in motion sickness : a hypothesis. » In : *Aviation, space, and environmental medicine* 65.11, p. 1032-1035.

Ebenholtz, S. M. (1977). « Determinants of the rod and frame effect : The role of retinal size ». In : *Perception & Psychophysics* 22.6, p. 531-538.

Ebenholtz, S. M. (1992). « Motion Sickness and Oculomotor Systems in Virtual Environments ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 1.3, p. 302-305.

Ebenholtz, S. M. (2001). *Oculomotor Systems and Perception*. Cambridge University Press. 236 p.

Edwards, C. et al. (2003). « Older and younger driver performance at complex intersections : Implications for using perception-response time and driving simulation ». In :

Ernsting, J. et al., éd. (1999). *Aviation Medicine*. 3rd edition. Oxford ; Woburn, MA : Hodder Education Publishers. 720 p.

Eversmann, T. et al. (1978). « Increased secretion of growth hormone, prolactin, antidiuretic hormone, and cortisol induced by the stress of motion sickness ». In : *Aviation, space & environmental medicine* 1, p. 53-57.

Fang, Z., F. Colombet et al. (2014). « Roll tilt thresholds for 8 dof driving simulators ». In : *DSC 2014 Europe* 16, p. 7.

Fang, Z., G. Reymond et al. (2011). « Performance Identification and Compensation of Simulator Motion Cueing Delays ». In : *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 11.4, p. 041003.

Fisher, D. L. et al. (2011). *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. CRC Press.

Flanagan, M. B. et al. (2004). « The role of vection, eye movements and postural instability in the etiology of motion sickness ». In : *Journal of Vestibular Research* 14.4, p. 335-346.

Frank, L. H. et al. (1988). « Effects of Visual Display and Motion System Delays on Operator Performance and Uneasiness in a Driving Simulator ». In : *Human Factors* 30.2.

Fuchs, P. et al. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle - Volume 1 : L'homme et l'environnement virutel*. 3e édition. Paris : Transvalor - Presses des mines. 412 p.

Garrott, W. R. (1994). *Simulator motion base sizing using simulation.* Rapp. tech. SAE Technical Paper.

Gay, L. N. et P. E. Carliner (1949). « The prevention and treatment of motion sickness I. seasickness ». In : *Science* 109.2832, p. 359-359.

Gianna, C. et al. (1996). « Thresholds for detection of motion direction during passive lateral whole-body acceleration in normal subjects and patients with bilateral loss of labyrinthine function ». In : *Brain research bulletin* 40.5-6, p. 443-447.

Gibson, J. J. (2014). *The ecological approach to visual perception : classic edition.* Psychology Press.

Golding, J. et H. Markey (1996). « Effect of frequency of horizontal linear oscillation on motion sickness and somatogravic illusion ». In : *Aviation, space, and environmental medicine* 67.2, p. 121-126.

Golding, J. F. (1992). « Phasic skin conductance activity and motion sickness. » In : *Aviation, space, and environmental medicine.*

Golding, J. F. (1998). « Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness ». In : *Brain Research Bulletin* 47.5, p. 507-516.

Golding, J. F. et M. A. Gresty (2013). « Motion sickness and disorientation in vehicles ». In : *Oxford textbook of vertigo and imbalance. Oxford University Press, Oxford*, p. 293-306.

Golding, J. F. (2006a). « Motion sickness susceptibility ». In : *Autonomic Neuroscience* 129.1, p. 67-76.

Golding, J. F. (2006b). « Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire ». In : *Personality and Individual Differences* 41.2, p. 237-248.

Gordon, C. R. et al. (1996). « The Vestibulo-Ocular Reflex and Seasickness Susceptibility ». In : *Journal of Vestibular Research* 6.4, p. 229-233.

Govil, V. et al. (2004). « A high-resolution wide-screen display for simulators and virtual reality ». In : *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting.* T. 48. 17. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, p. 2131-2133.

Gower, D. et al. (1988). « Simulator sickness in US Army and Navy fixed-and rotary-wing flight simulators ». In : *AGARD Conference Proceedings 433. Motion Cues in Flight Simulation and Simulator Induced Sickness.*

Graf, W. et F. Klam (2006). « Le système vestibulaire : anatomie fonctionnelle et comparée, évolution et développement ». In : *Comptes Rendus Palevol* 5.3-4, p. 637-655.

Graybiel, A. et J. Knepton (1976). « Sopite syndrome : a sometimes sole manifestation of motion sickness. » In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 47.8, p. 873-882.

Grezlikowski, H. et V. Schill (2000). « With Low Cost to High End - a PC approach at the Daimler-Chrysler Driving Simulator ». In : *DSC'2000, the Driving Simulator Conference.*

Griffin, M. J. (1978). « The evaluation of vehicle vibration and seats ». In : *Applied Ergonomics* 9.1, p. 15-21.

Griffin, M. J. (1990). *Handbook of Human Vibration.* Academic Press.

Grøntved, A. et al. (1988). « Ginger Root Against Seasickness : A Conctrolled Trial on the Open Sea ». In : *Acta Oto-Laryngologica* 105.1, p. 45-49.

Guedry, F. E. (1974). « Psychophysics of Vestibular Sensation ». In : *Vestibular System Part 2 : Psychophysics, Applied Aspects and General Interpretations*. Handbook of Sensory Physiology. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 3-154.

Gurfinkel, V. et Y. S. Levik (1993). « The suppression of cervico-ocular response by the haptokinetic information about the contact with a rigid, immobile object ». In : *Experimental brain research* 95.2, p. 359-364.

Harm, D. L. (1990). « Physiology of motion sickness symptoms ». In : *Motion and space sickness*, p. 154-177.

Harris, L. R. et al. (2000). « Visual and non-visual cues in the perception of linear self motion ». In : *Experimental Brain Research* 135.1, p. 12-21.

Hartfiel, B. et R. Stark (2019). « Influence of vestibular cues in head-mounted display-based driving simulators ». In : *Proceedings of the driving simulation conference 2019 Europe VR*. DSC (Strasbourg, France), p. 25-32.

Hartmann, T. et al. (2015). « Spatial presence theory : State of the art and challenges ahead ». In : *Immersed in Media*. Springer, p. 115-135.

Harwood, K. et P. Foley (1987). « Temporal resolution : an insight into the video display terminal (VDT)"problem" ». In : *Human Factors* 29.4, p. 447-452.

Haug, E. J. (1990). *Feasibility Study and Conceptual Design of a National Advanced Driving Simulator. Final Report*. Rapp. tech.

Hettinger, L. J., M. D. Nolan et al. (1987). « Visual display factors contributing to simulator sickness ». In : *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*. T. 31. 5. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, p. 497-501.

Hettinger, L. J. et G. E. Riccio (1992). « Visually Induced Motion Sickness in Virtual Environments ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 1.3, p. 306-310.

Hirose, T. et al. (1976). *Car-following simulation using automobile driving simulator*. Rapp. tech.

Hu, S., R. Stritzel et al. (1995). « P6 acupressure reduces symptoms of vection-induced motion sickness ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 66.7, p. 631-634.

Hu, S., M. S. Davis et al. (1997). « Effects of spatial frequency of a vertically striped rotating drum on vection-induced motion sickness. » In : *Aviation, space, and environmental medicine* 68.4, p. 306-311.

Hu, S., K. A. McChesney et al. (1999). « Systematic investigation of physiological correlates of motion sickness induced by viewing an optokinetic rotating drum ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 70.8, p. 759-765.

Idoux, E. et al. (2018). « No Gain No Pain : Relations Between Vestibulo-Ocular Reflexes and Motion Sickness in Mice ». In : *Frontiers in Neurology* 9.

Ihlen, E. A. F. E. (2012). « Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in Matlab ». In : *Frontiers in Physiology* 3.

IJsselsteijn, W. et al. (2001). « Effects of stereoscopic presentation, image motion, and screen size on subjective and objective corroborative measures of presence ». In : *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 10.3, p. 298-311.

Istl-Lenz, Y. et al. (1985). « Response of the human vestibulo-ocular reflex following long-term 2x magnified visual input ». In : *Experimental brain research* 57.3, p. 448-455.

Jacobs, M. C. et al. (1997). « Managing latency in complex augmented reality systems ». In : *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*. I3D '97. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 49-ff.

Jamson, H. (2000). « Driving simulation validity : issues of field of view and resolution ». In : *Proceedings of the driving simulation conference*, p. 57-64.

Jang, D. P. et al. (2002). « Analysis of physiological response to two virtual environments : driving and flying simulation ». In : *CyberPsychology & Behavior* 5.1, p. 11-18.

Jeong, S.-H. et al. (2010). « Vestibular dysfunction in migraine : effects of associated vertigo and motion sickness ». In : *Journal of Neurology* 257.6, p. 905-912.

Johnson, D. M. (2005). *Introduction to and review of simulator sickness research*. Rapp. tech. Army research inst field unit fort rucker al.

Johnson, D. M. (2007). *Simulator Sickness Research Summary*. Army research inst for the behavioral and social sciences fort rucker al, army research inst for the behavioral and social sciences fort rucker al.

Johnson, W. et al. (1993). « Motion sickness, vascular changes accompanying pseudo-coriolis-induced nausea. » In : *Aviation, space, and environmental medicine* 64.5, p. 367.

Kaleto, H. A. et al. (2001). « Advancements in Testing Methodologies in Response to the FMVSS 201U Requirements for Curtain-Type Side Airbags ». In : *SAE 2001 World Congress*. SAE International.

Kalra, N. et S. M. Paddock (2016). *Driving to Safety : How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability ?* Santa Monica, CA : RAND Corporation.

Kaplan, E. et E. Benardete (2001). « The dynamics of primate retinal ganglion cells ». In : *Progress in brain research*. T. 134. Elsevier, p. 17-34.

Kato, K. et S. Kitazaki (2008). *Improvement of ease of viewing images on an in-vehicle display and reduction of carsickness*. Rapp. tech. SAE Technical Paper.

Kemeny, A., F. Colombet et al. (2015). « How to avoid simulation sickness in virtual environments during user displacement ». In : t. 9392, p. 939206–939206-9.

Kemeny, A. (2000). « Simulation and perception of movement ». In : *Proceedings of driving simulation conference 2000* (Paris, France), p. 13-22.

Kemeny, A. (2014). « From Driving Simulation to Virtual Reality ». In : *Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference*. New York, NY, USA : ACM, 32 :1-32 :5.

Kemeny, A., P. George et al. (2017). « New VR Navigation Techniques to Reduce Cybersickness ». In : *Electronic Imaging* 2017.3, p. 48-53.

Kemeny, A. et F. Panerai (2003). « Evaluating perception in driving simulation experiments ». In : *Trends in cognitive sciences* 7.1, p. 31-37.

Kennedy, R. S., K. S. Berbaum et M. G. Lilienthal (1997). « Disorientation and postural ataxia following flight simulation ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 68.1, p. 13-17.

Kennedy, R. S., K. S. Berbaum, M. G. Lilienthal et al. (1987). *Guidelines for Alleviation of Simulator Sickness Symptomatology*. NAVTRASYSCEN-TR-87-007. Naval training systems center orlando fl, naval training systems center orlando fl.

Kennedy, R. S. et K. M. Stanney (1996). « Postural instability induced by virtual reality exposure : development of a certification protocol ». In : *International Journal of Human-Computer Interaction* 8.1, p. 25-47.

Kennedy, R. S., W. P. Dunlap et al. (1990). « Prediction of motion sickness susceptibility ». In : *Motion and space sickness*, p. 179-216.

Kennedy, R. S., M. G. Lilienthal et al. (1989). « Simulator sickness in US Navy flight simulators. » In : *Aviation, space, and environmental medicine* 60.1, p. 10-16.

Kennedy, R. S. et J. E. Fowlkes (1992). « Simulator Sickness Is Polygenic and polysymptomatic : Implications for Research ». In : *The International Journal of Aviation Psychology* 2.1, p. 23-38.

Kennedy, R. S., N. E. Lane et al. (1993). « Simulator Sickness Questionnaire : An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness ». In : *The International Journal of Aviation Psychology* 3.3, p. 203-220.

Kennedy, R. S. et L. H. Frank (1985). *A review of motion sickness with special reference to simulator sickness.* Rapp. tech. Canyon research group inc westlake village ca.

Kennedy, R. et al. (1988). « Simulator sickness ». In : *Motion and space sickness*, p. 317-341.

Keshavarz, B. et H. Hecht (2014). « Pleasant music as a countermeasure against visually induced motion sickness ». In : *Applied Ergonomics* 45.3, p. 521-527.

Keshavarz, B., D. Stelzmann et al. (2015). « Visually induced motion sickness can be alleviated by pleasant odors ». In : *Experimental Brain Research* 233.5, p. 1353-1364.

Kirkner, F. J. (1949). « Psychophysiological studies of motion sickness and airsickness ». In : *Journal of Comparative and Physiological Psychology* 42.4, p. 273-285.

Klier, E. M. et D. E. Angelaki (2010). « Gaze Stabilization and the VOR ». In : *Encyclopedia of Behavioral Neuroscience.* Sous la dir. de G. F. Koob et al. Oxford : Academic Press, p. 569-575.

Kohr, R. H. (1961). *Analysis and simulation of automobile ride.* Rapp. tech. SAE Technical Paper.

Kolasinski, E. (1995). *Simulator Sickness in Virtual Environments.* No. ARI-TR-1027. Army research inst for the behavioral and social sciences alexandria va.

Koslucher, F., E. Haaland, A. Malsch et al. (2015). « Sex differences in the incidence of motion sickness induced by linear visual oscillation ». In : *Aerospace medicine and human performance* 86.9, p. 787-793.

Koslucher, F., E. Haaland et T. A. Stoffregen (2016). « Sex differences in visual performance and postural sway precede sex differences in visually induced motion sickness ». In : *Experimental brain research* 234.1, p. 313-322.

Krauzlis, R. J. (2013). « Chapter 32 - Eye Movements ». In : *Fundamental Neuroscience (Fourth Edition).* Sous la dir. de L. R. Squire et al. San Diego : Academic Press, p. 697-714.

Lackner, J. (1990). « Human orientation, adaptation, and movement control ». In : *Motion sickness, visual displays, and armored vehicle design*, p. 28-50.

Lackner, J. R. (2014). « Motion sickness : more than nausea and vomiting ». In : *Experimental Brain Research* 232.8, p. 2493-2510.

Lackner, J. R. et A. Graybiel (1974). *Elicitation of Vestibular Side Effects by Regional Vibration of the Head,* NAMRL-1204. Naval aerospace medical research lab pensacola fl, naval aerospace medical research lab pensacola fl.

Lane, N. E. et R. S. Kennedy (1988). *A New Method for Quantifying Simulator Sickness : Development and Application of the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) ; Technical Report.* Essex Corporation.

Lappe, M. et al. (1999). « Perception of self-motion from visual flow ». In : *Trends in cognitive sciences* 3.9, p. 329-336.

LaViola Jr, J. J. (2000). « A discussion of cybersickness in virtual environments ». In : *ACM Sigchi Bulletin* 32.1, p. 47-56.

Lawther, A. et M. J. Griffin (1987). « Prediction of the incidence of motion sickness from the magnitude, frequency, and duration of vertical oscillation ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 82.3, p. 957-966.

Leclere, Q. et al. (2006). « Vibro-acoustique des moteurs d'automobile ». In : *Techniques de l'Ingenieur*, BM 2-773.

Lee, D. N. (1976). « A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision ». In : *Perception* 5.4, p. 437-459.

Lin, J. J.-W. et al. (2002). « Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment ». In : IEEE Virtual Reality.

Lo, W. et R. H. So (2001). « Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes ». In : *Applied ergonomics* 32.1, p. 1-14.

Lucena, J. et al. (2010). *Engineering and Sustainable Community Development.* Morgan & Claypool Publishers. 232 p.

Maeda, T. et al. (2005). « Virtual acceleration with galvanic vestibular stimulation in a virtual reality environment ». In : *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.* IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005. P. 289-290.

Mania, K. et al. (2004). « Perceptual sensitivity to head tracking latency in virtual environments with varying degrees of scene complexity ». In : *Proceedings of the 1st Symposium on Applied perception in graphics and visualization*, p. 39-47.

Matsushima, E. H. et al. (2003). « Perceptual constancy in judgments of egocentric distance : prevailing binocular information ». In : *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia* 66.5, p. 62-68.

McCauley, M. et T. Sharkey (1992). « Cybersickness : Perception of Self-Motion in Virtual Environment. » In : *Presence* 1, p. 311-318.

McCauley, M. E. (1984). *Research Issues in Simulator Sickness : Proceedings of a Workshop.* National Academies. 86 p.

McGrath, B. J. (2000). *Tactile instrument for aviation.* Naval aerospace medical research lab pensacola fl.

McLane, R. C. et W. W. Wierwille (1975). « The influence of motion and audio cues on driver performance in an automobile simulator ». In : *Human Factors* 17.5, p. 488-501.

Meehan, M. et al. (2003). « Effect of latency on presence in stressful virtual environments ». In : *IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings.* IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings. P. 141-148.

Miller, J. W. et J. E. Goodson (1960). « Motion sickness in a helicopter simulator ». In : *Aerospace Medicine* 31, p. 204-212.

Miller, J. et J. Goodson (1960). « Motion sickness in a helicopter simulator ». In : *Aerospace medicine* 31, p. 204-212.

Miller, K. E. et E. R. Muth (2004). « Efficacy of acupressure and acustimulation bands for the prevention of motion sickness ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 75.3, p. 227-234.

Mirzaei, M. A. (2014). « Influence of interaction techniques on vims in virtual environments : estimation et prédiction ». Thèse de doct. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM.

Mittelstaedt, H. (1997). « Interaction of eye-, head-, and trunk-bound information in spatial perception and control ». In : *Journal of Vestibular Research* 7.4, p. 283-302.

Money, K. E. (1970). « Motion sickness ». In : *Physiological Reviews* 50.1, p. 1-39.

Money, K. E. et B. S. Cheung (1983). « Another function of the inner ear : facilitation of the emetic response to poisons ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 54.3, p. 208-211.

Money, K. (1990). « Motion sickness and evolution ». In : *Motion and space sickness(A 93-55929 24-52). Boca Raton, FL, CRC Press, Inc., 1990,* p. 1-7.

Morrow, G. R. (1985). « The effect of a susceptibility to motion sickness on the side effects of cancer chemotherapy ». In : *Cancer* 55.12, p. 2766-2770.

Mourant, R. R., P. Rengarajan et al. (2007). « The effect of driving environments on simulator sickness ». In : *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting.* T. 51. 18. Sage Publications Sage CA : Los Angeles, CA, p. 1232-1236.

Mourant, R. R. et T. R. Thattacherry (2000). « Simulator Sickness in a Virtual Environments Driving Simulator ». In : *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 44.5, p. 534-537.

Mowrey, D. et D. Clayson (1982). « Motion sickness, ginger, and psychophysics ». In : *The Lancet* 319.8273, p. 655-657.

Munafo, J., C. Curry et al. (2016). « The distance of visual targets affects the spatial magnitude and multifractal scaling of standing body sway in younger and older adults ». In : *Experimental Brain Research* 234.9, p. 2721-2730.

Munafo, J., M. Diedrick et al. (2017). « The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects ». In : *Experimental Brain Research* 235.3, p. 889-901.

Nachum, Z. et al. (2002). « Active High-Frequency Vestibulo-Ocular Reflex and Seasickness Susceptibility ». In : *The Laryngoscope* 112.1, p. 179-182.

Neimer, J. et al. (2001). « Trains with a view to sickness ». In : *Current Biology* 11.14, R549-R550.

Neimer, J. (2002). « Cinétoses ferroviaires provoquées par la pendulation active des rames : approche différentielle ». Thèse de doct. Grenoble 2.

Nes, I. J. W. van et al. (2004). « Short-Term Effects of Whole-Body Vibration on Postural Control in Unilateral Chronic Stroke Patients : Preliminary Evidence ». In : *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 83.11, p. 867.

Nichols, B. et S. J. Lederman (1980). « Flicker and motion in film ». In : *The cinematic apparatus*. Springer, p. 96-105.

Nichols, S. et H. Patel (2002). « Health and safety implications of virtual reality : a review of empirical evidence ». In : *Applied ergonomics* 33.3, p. 251-271.

Nichols, S., A. D. Ramsey et al. (2000). « Incidence of Virtual Reality Induced Symptoms and Effects (VRISE) in desktop and projection screen display systems ». In : *HSE Contract Research Report*.

Nobel, G. et al. (2012). « Effects of motion sickness on thermoregulatory responses in a thermoneutral air environment ». In : *European Journal of Applied Physiology* 112.5, p. 1717-1723.

Nordmark, S., H. Jansson et al. (2004). « The new VTI driving simulator. Multi purpose moving base with high performance linear motion ». In : *DSC 2004 Europe (driving simulation conference)*, p. 45-55.

Nordmark, S., M. Lidstrom et al. (1984). *Moving base driving simulator with wide angle visual system*. Rapp. tech. SAE Technical Paper.

O'Hanlon, J. F. et M. E. McCauley (1974). « Motion sickness incidence as a function of the frequency and acceleration of vertical sinusoidal motion ». In : *Aerospace Medicine* 45.4, p. 366-369.

Oman, C. M. (1982). « A Heuristic Mathematical Model for the Dynamics of Sensory Conflict and Motion Sickness ». In : *Acta Oto-Laryngologica* 94 (sup392), p. 4-44.

Oman, C. M. (1990). « Motion sickness : a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory ». In : *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 68.2, p. 294-303.

Oman, C. M. (2011). « Are evolutionary hypotheses for motion sickness "just-so" stories ? » In : *Journal of Vestibular Research* 22.2, p. 117-127.

Page, N. et M. A. Gresty (1985). « Motorist's vestibular disorientation syndrome. » In : *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 48.8, p. 729-735.

Paige, G. et E. Sargent (1991). « Visually-induced adaptive plasticity in the human vestibulo-ocular reflex ». In : *Experimental Brain Research* 84.1, p. 25-34.

Palmisano, S. (1996). « Perceiving self-motion in depth : The role of stereoscopic motion and changing-size cues ». In : *Perception & Psychophysics* 58.8, p. 1168-1176.

Papadakis, G. et al. (2011). « A system to measure, control and minimize end-to-end head tracking latency in immersive simulations ». In : *Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry*, p. 581-584.

Park, G. D. et al. (2006). « Simulator sickness scores according to symptom susceptibility, age, and gender for an older driver assessment study ». In : *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*. T. 50. 26. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, p. 2702-2706.

Parker, D. E. et D. L. Harm (1992). « Mental rotation : a key to mitigation of motion sickness in the virtual environment ? » In : *Presence : Teleoperators & Virtual Environments* 1.3, p. 329-333.

Parker, L. A. et al. (2011). « Regulation of nausea and vomiting by cannabinoids ». In : *British Journal of Pharmacology* 163.7, p. 1411-1422.

Pausch, R. et al. (1992). « A Literature Survey for Virtual Environments : Military Flight Simulator Visual Systems and Simulator Sickness ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 1.3, p. 344-363.

Perroud, B. et al. (2018). « Effects of Latency on Aiming Performance for CAVE-like Immersive Virtual Reality Systems and Driving Simulators ». In :

Petroni, A. et al. (2015). « Proprioceptive Body Illusions Modulate the Visual Perception of Reaching Distance ». In : *PLOS ONE* 10.6, e0131087.

Plouzeau, J. (2013). « Mise en oeuvre et évaluation de vibrations pour l'amélioration de la perception dans un simulateur automobile ». Thèse de doct.

Plouzeau, J. et al. (2018). « Using cybersickness indicators to adapt navigation in virtual reality : a pre-study ». In : *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, p. 661-662.

Pretto, P. et al. (2014). « Variable Roll-rate Perception in Driving Simulation ». In : *Proceding of Driving Simulation Conference 2014 Europe VR*. DSC 2014. INRETS, p. 1-7.

Prothero, J. D. (1998). « The role of rest frames in vection, presence and motion sickness ». Thèse de doct. University of Washington.

Prothero, J. D., M. H. Draper et al. (1997). « Do visual background manipulations reduce simulator sickness ». In : *Proceedings of the international workshop on motion sickness : medical and human factors*, p. 18-21.

Prothero, J. D., M. H. Draper et al. (1999). « The use of an independent visual background to reduce simulator side-effects. » In : *Aviation, space, and environmental medicine* 70.3 Pt 1, p. 277-283.

Prothero, J. D. et D. E. Parker (2003). « A Unified Approach to Presence and Motion Sickness ». In : *Virtual and adaptive environments : Applications, implications, and human performance issues*, p. 47-66.

Reason, J. T. (1978). « Motion sickness adaptation : a neural mismatch model. » In : *Journal of the Royal Society of Medicine* 71.11, p. 819-829.

Reason, J. T. (1968). « Relations between motion sickness susceptibility, the spiral after-effect and loudness estimation ». In : *British Journal of Psychology* 59.4, p. 385-393.

Reason, J. et J. Brand (1975). *Motion sickness*. T. vii. Oxford, England : Academic Press. 310 p.

Regan, M. J. et al. (1999). « A real-time low-latency hardware light-field renderer ». In : *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, p. 287-290.

Rengifo, C. et al. (2019). « Feasibility Analysis For Constrained Model Predictive Control Based Motion Cueing Algorithm ». In : *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 2076-2082.

Rengifo, C. (2020). « Contrôle plateforme pour la validation du véhicule autonome sur simulateur dynamique à hautes performances ». Thèse de doct. Paris, HESAM.

Reschke, M. et al. (2006). « Stroboscopic vision as a treatment for motion sickness : Strobe lighting vs. shutter glasses ». In : *Aviation, space, and environmental medicine* 77, p. 2-7.

Reschke, M. F. et al. (2007). *Stroboscopic Vision as a Treatment for Space Motion Sickness.*

Reymond, G. et al. (1999). « Contribution of a motion platform to kinesthetic restitution in a driving simulator ». In : *DSC'99 : Driving simulation conference (Paris, July 7-8 1999)*, p. 123-136.

Reymond, G. (2000). « Contribution respective des stimuli visuels, vestibulaires et proprioceptifs dans la perception du mouvement du conducteur ». Thèse de doct. Paris 6.

Riccio, G. E. et T. A. Stoffregen (1991). « An ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability ». In : *Ecological Psychology* 3.3, p. 195-240.

Riecke, B. E., J. Schulte-Pelkum, F. Caniard et H. H. Bulthoff (2005). « Towards lean and elegant self-motion simulation in virtual reality ». In : *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.* IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005. P. 131-138.

Riecke, B. E., J. Schulte-Pelkum, M. N. Avraamides et al. (2006). « Cognitive factors can influence self-motion perception (vection) in virtual reality ». In : *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 3.3, p. 194-216.

Riecke, B. E., J. Schulte-Pelkum, F. Caniard et H. H. Bülthoff (2005). « Influence of auditory cues on the visually-induced self-motion illusion (circular vection) in virtual reality ». In : *8th International Workshop on Presence (PRESENCE 2005).* University College London, p. 49-57.

Rizzo, M. et al. (2003). « Demographic and driving performance factors in simulator adaptation syndrome ». In : *Driver Assessment, Training and Vehicle Design.*

Robinson, D. A. (2011). « Control of Eye Movements ». In : *Comprehensive Physiology.* Sous la dir. de R. Terjung. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc.

Robinson, T. et al. (2010). « Operating platoons on public motorways : An introduction to the sartre platooning programme ». In : *17th world congress on intelligent transport systems.* T. 1, p. 12.

Roll, J. et J. Vedel (1982). « Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography ». In : *Experimental brain research* 47.2, p. 177-190.

Rolnick, A. et R. E. Lubow (1991). « Why is the driver rarely motion sick ? The role of controllability in motion sickness ». In : *Ergonomics* 34.7, p. 867-879.

Rüttimann, M. et D. Vautrin (2017). « Histoire de la simulation médicale militaire ». In : *médecine et armées* 45.5, p. 495-500.

Saidi, F. et al. (2010). « Transport Delay Characterization of SCANeR Driving Simulator ». In : Driving simulation conference Europe 2010.

Sanderson, J. et al. (2007). « Measurement of oscillopsia induced by vestibular Coriolis stimulation ». In : *Journal of Vestibular Research : Equilibrium & Orientation* 17.5, p. 289-299.

Sandin J. et al. (2016). « Effects of sensory cues on perceived simulated speed ». In : *DSC 2016 Europe*, p. 171-178.

Sandini, G. et al. (2001). « The role of inertial and visual mechanisms in the stabilization of gaze in natural and artificial systems ». In : *Motion Vision.* Springer, p. 189-218.

Sang, F. D. Y. P. et al. (2003). « Behavioral methods of alleviating motion sickness : effectiveness of controlled breathing and a music audiotape ». In : *Journal of travel medicine* 10.2, p. 108-111.

Sawada, Y. et al. (2020). « Effects of synchronised engine sound and vibration presentation on visually induced motion sickness ». In : *Scientific Reports* 10.1, p. 7553.

Schmäl, F. (2013). « Neuronal mechanisms and the treatment of motion sickness ». In : *Pharmacology* 91.3-4, p. 229-241.

Schulte-Pelkum, J. et al. (2004). *Vibrational cues enhance believability of ego-motion simulation.*

Selva, P. et C. M. Oman (2012). « Relationships between Observer and Kalman Filter models for human dynamic spatial orientation ». In : *Journal of Vestibular Research* 22.2, p. 69-80.

Shahal, B. et al. (1999). « Computerized Dynamic Posturography and Seasickness Susceptibility ». In : *The Laryngoscope* 109.12, p. 1996-2000.

Shupak, A. et al. (1990). « Vestibulo-Ocular Reflex as a Parameter of Seasickness Susceptibility , Vestibulo-Ocular Reflex as a Parameter of Seasickness Susceptibility ». In : *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology* 99.2, p. 131-136.

Silverman, D. R. et R. A. Slaughter (1995). *An Exploration of Simulator Sickness in the MH-60G Operational Flight Trainer, An Advanced Wide Field-of-View Helicopter Trainer.* Rapp. tech. Dayton univ oh research inst.

Sivak, M. et B. Schoettle (2015). « Motion sickness in autonomous cars : Don't read and ride | UMTRI - University of Michigan Transportation Research Institute ». In :

Sjoberg, A. (1970). « Experimental studies of the eliciting mechanism of motion sickness ». In : *Symposium on the Role of the Vestibular Organs in Space Exploration.* T. 187. National Academies, p. 7.

Smart, L. J. et al. (2002). « Visually Induced Motion Sickness Predicted by Postural Instability ». In : *Human Factors* 44.3, p. 451-465.

Sra, M. et al. (2019). « Adding Proprioceptive Feedback to Virtual Reality Experiences Using Galvanic Vestibular Stimulation ». In : *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems.* CHI '19. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, p. 1-14.

Stanney, K. M. et P. Hash (1998). « Locus of user-initiated control in virtual environments : Influences on cybersickness ». In : *Presence* 7.5, p. 447-459.

Stanney, K. M., R. R. Mourant et al. (1998). « Human factors issues in virtual environments : A review of the literature ». In : *Presence* 7.4, p. 327-351.

Stern, R. et al. (1985). « Tachygastria and motion sickness. » In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 56.11, p. 1074.

Stern, R. M. et al. (1990). « The effects of fixation and restricted visual field on vection-induced motion sickness. » In : *Aviation, space, and environmental medicine.*

Stoffregen, T. A. et L. J. Smart (1998). « Postural instability precedes motion sickness ». In : *Brain Research Bulletin* 47.5, p. 437-448.

Stoffregen, T. A., F.-C. Chen et al. (2013). « Getting your sea legs ». In : *PLoS One* 8.6, e66949.

Stoffregen, T. A., E. Faugloire et al. (2008). « Motion Sickness and Postural Sway in Console Video Games ». In : *Human Factors* 50.2, p. 322-331.

Stoffregen, T. A., L. J. Hettinger et al. (2000). « Postural Instability and Motion Sickness in a Fixed-Base Flight Simulator ». In : *Human Factors* 42.3, p. 458-469.

Stoffregen, T. A. et G. E. Riccio (1988). « An ecological theory of orientation and the vestibular system. » In : *Psychological Review* 95.1, p. 3-14.

Stoffregen, T. A. et G. E. Riccio (1991). « An Ecological Critique of the Sensory Conflict Theory of Motion Sickness ». In : *Ecological Psychology* 3.3, p. 159-194.

Straube, A. et al. (2012). « Nystagmus and oscillopsia ». In : *European Journal of Neurology* 19.1, p. 6-14.

Tanguy, S. et al. (2008). « Vestibulo-ocular reflex and motion sickness in figure skaters ». In : *European Journal of Applied Physiology* 104.6, p. 1031-1037.

TechnoConcept (2007). *Techno-concept balance board manual.*

Thomley, K. E. et al. (1986). « Development of postural equilibrium tests for examining environmental effects ». In : *Perceptual and motor skills* 63.2, p. 555-564.

Treisman, M. (1977). « Motion sickness : an evolutionary hypothesis ». In : *Science* 197.4302, p. 493-495.

Tsugawa, S. (1994). « Vision-based vehicles in Japan : machine vision systems and driving control systems ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 41.4, p. 398-405.

Turner, M. et al. (2000). « Airsickness and aircraft motion during short-haul flights. » In : *Aviation, space, and environmental medicine* 71.12, p. 1181-1189.

Uliano, K. C. et al. (1986). *The Effects of Asynchronous Visual Delays on Simulator Flight Performance and the Development of Simulator Sickness Symptomatology.* Essex corp orlando fl, essex corp orlando fl.

Vaitl, D. et al. (2002). « Shifts in blood volume alter the perception of posture : further evidence for somatic graviception ». In : *International Journal of Psychophysiology* 44.1, p. 1-11.

Van Erp, J. B. F. et H. A. H. C. Van Veen (2004). « Vibrotactile in-vehicle navigation system ». In : *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour* 7.4, p. 247-256.

Van Erp, J. B. et P. Padmos (2003). « Image parameters for driving with indirect viewing systems ». In : *Ergonomics* 46.15, p. 1471-1499.

Vidal, P. P. et al. (2015). « Chapter 28 - The Vestibular System ». In : *The Rat Nervous System (Fourth Edition).* Sous la dir. de G. Paxinos. San Diego : Academic Press, p. 805-864.

Viirre, E. et al. (1998). « Adaptation of the VOR in patients with low VOR gains ». In : *Journal of Vestibular Research : Equilibrium & Orientation* 8.4, p. 331-334.

Viirre, E. S. et J. L. Demer (1996). « The human vertical vestibulo-ocular reflex during combined linear and angular acceleration with near-target fixation ». In : *Experimental Brain Research* 112.2, p. 313-324.

Villard, S. J. et al. (2008). « Postural Instability and Motion Sickness in a Virtual Moving Room ». In : *Human factors* 50.2, p. 332-345.

Wachenfeld, W. et H. Winner (2015). « Virtual Assessment of Automation in Field Operation A New Runtime Validation Method ». In : *FAS 2015* 10, p. 169-179.

Wachenfeld, W. et H. Winner (2016). « The Release of Autonomous Vehicles ». In : *Autonomous Driving.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 425-449.

Wachenfeld, W. H. K. (2017). « How Stochastic can Help to Introduce Automated Driving ». Thèse de doct. Darmstadt : Technische Universität Darmstadt.

Webb, N. A. et M. J. Griffin (2003). « Eye Movement, Vection, and Motion Sickness with Foveal and Peripheral Vision ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 74.6, p. 622-625.

Weir, D. H. et A. J. Clark (1995). « A survey of mid-level driving simulators ». In : *SAE transactions*, p. 86-106.

Welch, R. B. (1986). « Adaptation of space perception ». In : *Handbook of perception and human performance* 1.24.

Whittinghill, D. M. et al. (2015). « Nasum Virtualis : A Simple Technique for Reducing Simulator Sickness in Head Mounted VR ». In : Game Developers Conference. San Francisco.

Winkle, T. (2016). « Safety Benefits of Automated Vehicles : Extended Findings from Accident Research for Development, Validation and Testing ». In : *Autonomous Driving*. Sous la dir. de M. Maurer et al. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 335-364.

WIST, E. R. et al. (1983). « Oscillopsia and retinal slip : evidence supporting a clinical test ». In : *Brain* 106.1, p. 153-168.

Wolf, I. (2016). « The Interaction Between Humans and Autonomous Agents ». In : *Autonomous Driving : Technical, Legal and Social Aspects*. Sous la dir. de M. Maurer et al. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 103-124.

Wood, C. D. et al. (1986). « The effect of antimotion sickness drugs on habituation to motion ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 57.6, p. 539-542.

Yates, B. et al. (1998). « Physiological basis and pharmacology of motion sickness : an update ». In : *Brain research bulletin* 47.5, p. 395-406.

Zacharias, G. L. et L. R. Young (1981). « Influence of combined visual and vestibular cues on human perception and control of horizontal rotation ». In : *Experimental Brain Research* 41.2, p. 159-171.

Zhang, L.-L. et al. (2016). « Motion Sickness : Current Knowledge and Recent Advance ». In : *CNS Neuroscience & Therapeutics* 22.1, p. 15-24.

Zupan, L. et al. (1994). « Modelization of Vestibulo-Ocular Reflex (VOR) and Motion Sickness Prediction ». In : *ICANN '94*, p. 106-109.

WEBOGRAPHIE

ASFA. *Association des sociétés françaises d'autoroutes.* URL : https://www.autoroutes.fr/fr/asfa.htm.

Boarding Ring. *Boarding Glasses.* URL : https://boardingglasses.com/.

D-Box. *Simulation.* URL : https://www.d-box.com/professionnels/expertise/simulation-et-formation/.

DARPA. *The Grand Challenge.* URL : https://www.darpa.mil/about-us/timeline/-grand-challenge-for-autonomous-vehicles.

Enable S3. *Project.* URL : https://enable-s3.eu/about-project/.

Gaze Intelligence. *Eye Tracking.* URL : https://gazeintelligence.com/eye-tracking-solutions.

Groupe Renault. URL : https://group.renault.com/.

Groupe Renault. *« ROADS », le nouveau simulateur de conduite de Renault pour les véhicules autonomes.* URL : https://group.renault.com/news-onair/actualites/roads-le-nouveau-simulateur-de-conduite-de-renault-pour-les-vehicules-autonomes/.

Groupe Renault. *Renault Symbioz demo car : des technologies au profit du bien-être à bord.* URL : https://group.renault.com/news-onair/actualites/renault-symbioz-demo-car-des-technologies-au-profit-du-bien-etre-a-bord/.

Groupe Renault. *Simulation physique et virtuelle : duo gagnant pour la conduite autonome.* URL : https://group.renault.com/actualites/blog-renault/simulation-physique-et-virtuelle-duo-gagnant-pour-la-conduite-autonome/.

PEGASUS. *Project.* URL : http://www.pegasus-projekt.info/en/.

Pupil Labs. *Pupil Core.* URL : https://pupil-labs.com/products/core/.

ReliefBand. *Bracelet.* URL : https://www.reliefband.com/.

SAE. URL : https://www.sae.org/.

vMocion. *Putting the Motion in Virtual Reality.* URL : http://www.vmocion.com/technology.html.

Wikibooks. *Système vestibulaire.* URL : https://fr.wikibooks.org/wiki/Syst%C3%A8mes_sensoriels/Syst%C3%A8me_Vestibulaire.

Annexes

ANNEXES DE L'ÉTUDE : AJOUT DE MODALITÉS VIBRATOIRES

Questionnaire préliminaire

Participant : _____

,

Sexe : H / F

Age :

Vous sentiez-vous en forme avant l'expérimentation ?

Étiez-vous stressé avant la première simulation ?

Avez-vous le permis ? Oui / Non / En cours Année :

Si oui êtes-vous un conducteur régulier ?

Pas du tout	0	1	2	3	4	Tous les jours

Êtes-vous souvent malade dans les transports ?

Pas du tout	0	1	2	3	4	À chaque fois

Êtes-vous un joueur de jeux-vidéo ?

Pas du tout	0	1	2	3	4	Joueur régulier

Êtes-vous familier avec la réalité virtuelle/simulateur ?

Pas du tout	0	1	2	3	4	Expert

Classez les différentes modalités de vibration en fonction de votre ressenti :

Commentaires / remarques / observations :

Questionnaire SSQ

Participant : _____ Exp : ___

,

Consignes : Cochez à quel point chaque symptôme ci-dessous vous affecte présentement.

	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
1. Inconfort général				
2. Fatigue				
3. Mal de tête				
4. Fatigue des yeux				
5. Difficulté à faire le focus				
6. Augmentation de la salivation				
7. Transpiration				
8. Nausées				
9. Difficulté à se concentrer				
10. Impression de lourdeur dans la tête				
11. Vision embrouillée				
12. Étourdissement les yeux ouverts				
13. Étourdissement les yeux fermés				
14. Vertiges[1]				
15. Conscience de l'estomac[2]				
16. Rots				

[1] Les vertiges sont vécus comme une perte de l'orientation par rapport à la position verticale.

[2] L'expression « conscience de l'estomac » est habituellement utilisée pour désigner un sentiment d'inconfort sans nausée.

A simulation sickness study on a driving simulator equipped with a vibration platform

Guillaume Lucas[1,2], Andras Kemeny[1,2,3], Damien Paillot[2] and Florent Colombet[1]

(1) Renault, DEA-TD, TCR AVA 013, 1 avenue du golf, 78280 Guyancourt, France. E-mail: {guillaume.lucas, andras.kemeny, florent.colombet}@renault.com
(2) Métier ParisTech, LISPEN, CNRS, Institut Image, 2 rue Thomas Dumorey. E-mail: {guillaume.lucas, andras.kemeny}@ensam.eu, damien.paillot@u-bourgogne.fr
(3) AVSimulation, 1 Cours de l'Île Seguin, 92100 Boulogne-Billancourt, France. E-mail: andras.kemeny@avsimulation.fr

Keywords: *Driving simulation · Simulator sickness · Motion sickness · Vibrations*

Introduction

The use of driving simulation can sometimes be limited by its well-known side effect the simulator sickness [Kol95]. This phenomenon is a specific form of motion sickness, which is quite similar to those that appear in virtual reality or transportation. Motion sickness is mainly due to the perception of movements and this not only concerns physical motions but also visual motions [Het92]. With varying susceptibility, most people suffer from motion sickness in their own way, except people without organs of balance who have been shown to be insensitive to both physical and visual motion [Gol06]. Motion sickness is mostly considered as a comfort issue in transports; however, in the case of driving simulation, it also affects task performance [Mon70] and limits the duration of the simulations because of its symptoms which can range widely from pallor to vomiting [Ken92]. Although motion sickness has been extensively studied over the past decades, its causes and the mechanisms involved are not fully understood yet and several theories exist [Rea78, Ric91, Tre77]. The most prominent, the sensory conflict and rearrangement, suggests that the sickness occurs when the information delivered by the visual, vestibular and somatosensory senses are not congruent with each other or with what is expected based on the internal models built from previous experiences [Rea78].

The goal of the present study is to investigate an alternative solution to reduce simulator sickness with some seat vibrations. Vibrations of the seat has already been suggested by M. McCauley and T. Sharkey in 1992 [McC92], that it may be effective to reduce simulator sickness by providing noise to the vestibular and proprioceptive senses. However, Casali [Cas85] has shown that simple random vibration alone is not enough to eliminate the sickness. Nonetheless, we know that motion sickness only occurs at motion frequencies below 1Hz [O'H74], while higher vibration frequencies are not sickening. Based on these assumptions, J.E.Bos [Bos15] proved that motion sickness due to low-frequency motion can be reduced by adding a high-frequency vibration directly to the head, but not through the seat. However, providing vibration to the head might not be feasible in some situations and can really disturb the driver. Seat vibration, on the other hand, provides more proprioceptive cues and can influence the abdominal motion sensors, but could also deliver a subtle vestibular cue. Proprioceptive cues which can be tricked by applying specific vibration on muscle in the range of 60 to 100Hz [Pet15], which are much higher than 1Hz.

In addition to this first assumption, the effect of more realistic seat vibrations is also studied in the present study. They are use in some driving simulators and are known for improving the perception of speed [San16] and may deliver additional kinesthetic cues that supports the visual perception of motion. Consequently, according to the theory of Reason [Rea78], the sensory conflict could be reduced and thus leading to less simulator sickness. Consequently, we wanted to test whether different kinds of vibrations to the seat could have an influence on simulator sickness.

Methods

Experimental design

Three configurations of vibration were considered in this study: first in the reference condition no vibration was rendered. In the second condition, vibration was rendered consistently with the simulation, thanks to the SCANeR Studio software and are based on the vehicle speed and the road surface. Then in the third condition, vibration was rendered randomly in the frequency domain that can disturb the proprioception (60 Hz to 100 Hz).

Simulator design

This study has been held at the Arts et Métiers ParisTech Institut Image in Chalon-sur-Saône on the SI2M simulator platform. This simulator platform consists of one car seat, pedals and steering-wheel mounted on 4 D-BOX actuators (see figure1). It was first designed to operate in a CAVE, but for this study we used

the Oculus Rift CV1 Head-Mounted Display (HMD) for the visual and sound rendering. The D-BOX actuators system allows the platform a small liberty of movements in order to make the user feel the road (turn, speed bump etc.), but specially they are fast enough to generate vibrations to simulate the road contact (frequency range 0-100Hz). This simulator is running thanks to three computers: one to manage the platform, the second to handle the visual rendering on the HMD and the last, the master, to manage the two others and handle the simulation, scenario, etc. The visual refresh rate was clocked to 75Hz for the software.

Scenario design

The scenario has been developed with SCANeR Studio 1.7. Subjects were placed in an autonomous vehicle driving in a city environment and doing three tours of the same circuit (see Figure 3) for a total duration of 3 minutes 45s. The car was driving at 50 km/h with some slowdown at 30km. All traffic lights were green so the car did not have to stop. Some other traffic cars were simulated on the road but no pedestrian. The subject was virtually immersed at the driver's seat of a Renault Scenic. The autonomous car accelerated at the beginning of the simulation with a slow acceleration of 1m/s^2 and stopped at the end of the simulation with a deceleration of 1 m/s^2 also, so that the subject could put and remove the HMD in a car at a standstill.

Figure 1: SI2M Simulator

Figure 2: Visual overview of the driver vision

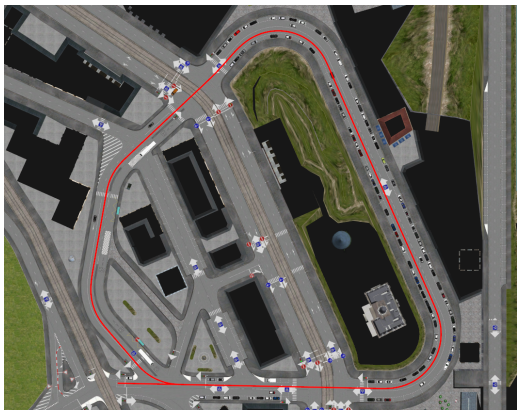


Figure 3: Scenario circuit

Measurements

The simulator sickness was measured with two different procedures: a subjective one: SSQ Questionnaire, and an objective one: measure of the postural instability.

Thirty-two persons volunteered for this study, twenty-five men and six women, from 19 to 69 years old (Mean = 27.5; SD = 14.7). All the subjects have driven in the three configurations separated by at least 6 hours in order to avoid interference like sickness accumulation or habituation effects [Joh07]. Configurations order was random between subjects in order to avoid rank effects.

Results

For the analysis we used the Wilcoxon paired Signed-Rank Test, a non-parametric test allowing comparison of the effects of a parameter on correlated-samples (same subjects). We used a non-parametric test because the samples cannot be assimilated to a normal distribution.

Table 1: data analysis of the SSQ results depending of the configurations

	Mean	Min/max	Standard deviation
Without vibrations	40.5	7.48/134.6	32.3
Consistent vibrations	17.4	0/63.58	18.0
Proprioceptive vibrations	21.4	0/63.58	19.1

Table 2: Means and standard deviations of postural measures data depending on the configuration

	Mean (mm^2)	Standard deviation (mm^2)
Without vibrations	79.7	77.4
Consistent vibrations	43.5	45.1
Proprioceptive vibrations	52.0	56.6

SSQ

The subjects reacted very differently to the simulations. As we can see in Table 1 the population is scattered (mean ≈ standard deviation). Some were not really affected by the simulation, but in the other hand some others were really affected and became quite sick. This also induced that the samples cannot be assimilated to a normal distribution, confirmed with a Shapiro–Wilk test of normality ($p_{without}$ = 1,5 .10^{-3} ; $p_{consistent}$ = 1,1 .10^{-4} ; $p_{proprioceptive}$ = 2,8 .10^{-4}).

Postural

The postural stability also confirms the SSQ results, however with a lower significance. Like previously, the data cannot be assimilated to a normal distribution and a Shapirow-Wilks test confirms this assumption (p_w = 0,00131; p_c = 0,178; p_p = 0,0363). As for SSQ test results, any type of vibrations seems to help to reduce the simulator sickness ($p_{w\text{-}c}$ = 8,72 .10-5; $p_{w\text{-}p}$ = 3,33 .10-6) but also no significant difference is found between the two vibration configurations ($p_{c\text{-}p}$ = 0.275).

Discussion

The goal of this study was to investigate whether the seat vibration could reduce the simulator sickness. Our findings show that some specific seat vibration could alleviate the symptoms of motion sickness, as indicated by reductions in the SSQ as well as in the postural stability measure. However, the difference between the two vibrations configuration is not really significant, even if the consistent vibration has better scores.

As stated in the introduction, functioning organs of balance are essential in the origin of motion sickness, because people lacking them do not get sick from motion. However, the vibration was applied to the seat and not directly to the head like in the study of J.E. Bos [Bos15]. In both studies, the frequency of the vibration was well above 1Hz, which is known to be the limit for causing sickness. Because the proprioception and the abdominal tissues may have a role in the genesis of motion sickness, we have here chosen to explore the effect of seat vibration. As shown by the third configuration, vibrations in the range that can disturb the proprioceptive is effective to alleviate simulator sickness. Furthermore, in the second configuration with consistent vibrations, we can observe that some of its peak vibration density are in this range. Consequently, in addition to be consistent with reality, it may also affect the proprioception in a similar way than the third configuration.

Despite the vibrations were here applied to the seat and not directly to the head, the vestibular system is still affected by these vibrations. Indeed, even if the body acts like a shock absorber, here because the driver is seated there is just the high part of the spinal column that absorb the vibration before the head, even less if the driver put his head against the headrest. Thus, the sickness reduction may also be due to a similar effect than the one observed by Bos.

In static driving simulation, one of the most disturbing moment is during the turns, due to sensory discrepancies being maximum at these moments. Several verbal reports from the participants tend to show that these discrepancies were noticed at these moments in all three configurations but were disturbing only in the first configuration when there was no vibration rendering. This seems to suggest that vibrations may have served as a mental distractor.

As we have seen, there is no significant difference on simulation sickness between the two configurations with vibrations. Nonetheless, the participants found the third configuration less pleasant although it is not supported by significant results either. Since the scenario was quite short (≈ 4 min) it could explain why the difference was not significative. But with a longer simulation the “annoying” effect of the proprioceptive vibration could induce a significant less comfortable feeling. The link with motion sickness would yet to be proved and validated in further experiments.

References

Bos J.E., **Less sickness with more motion and/or mental distraction**, *Journal of Vestibular Research*, (1): 23–33, 2015.

J. G. Casali, **Vehicular Simulation-Induced Sickness. Volume 1. An Overview.**, Tech. Rep. IEOR-8501, VIRGINIA POLYTECHNIC INST AND STATE UNIV, 1985.

J. F. Golding, **Motion sickness susceptibility**, *Autonomic Neuroscience*, vol. 129(1-2): 67–76, 2006.

L. J. Hettinger and G. E. Riccio, **Visually Induced Motion Sickness in Virtual Environments**, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 1(3): 306–310, 1992.

D. M. Johnson, **Simulator Sickness Research Summary**, Tech. rep., ARMY RESEARCH INST FOR THE BEHAVIORAL AND SOCIAL SCIENCES FORT RUCKER AL, ARMY RESEARCH INST FOR THE BEHAVIORAL AND SOCIAL SCIENCES FORT RUCKER AL, 2007.

R. S. Kennedy and J. E. Fowlkes, **Simulator Sickness Is Polygenic and polysymptomatic: Implications for Research**, *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 2(1): 23–38, 1992.

E. M. Kolasinski, **Simulator Sickness in Virtual Environments.**, Tech. Rep. No. ARI-TR-1027, ARMY RESEARCH INST FOR THE BEHAVIORAL AND SOCIAL SCIENCES ALEXANDRIA VA., 1995.

M. McCauley and T. Sharkey, **Cybersickness: Perception of Self-Motion in Virtual Environment.**, *Presence*, vol. 1: 311–318, 1992.

K. E. Money, **Motion sickness**, *Physiological Reviews*, vol. 50(1): 1–39, 1970.

J. F. O'Hanlon and M. E. McCauley, **Motion sickness incidence as a function of the frequency and acceleration of vertical sinusoidal motion**, *Aerospace Medicine*, vol. 45(4): 366–369, 1974.

A. Petroni, M. J. Carbajal and M. Sigman, **Proprioceptive Body Illusions Modulate the Visual Perception of Reaching Distance**, *PLOS ONE*, vol. 10(6): e0131087, 2015.

J. T. Reason, **Motion sickness adaptation: a neural mismatch model.**, *Journal of the Royal Society of Medicine*, vol. 71(11): 819–829, 1978.

G. E. Riccio and T. A. Stoffregen, **An ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability**, *Ecological Psychology*, vol. 3(3): 195–240, 1991.

Sandin J., F. M., Erikson L. and Augusto B., **Effects of sensory cues on perceived simulated speed**, *DSC 2016 Europe*, 171–178, 2016.

M. Treisman, **Motion sickness: an evolutionary hypothesis**, *Science*, vol. 197(4302): 493–495, 1977.

Article Transport Research part F

Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour xxx (xxxx) 1–8

Contents lists available at ScienceDirect

Transportation Research Part F: Psychology and

journal homepage: http://ees.elsevier.com

A simulation sickness study on a driving simulator equipped with a vibration platform

Guillaume Lucas [a,b], Andras Kemeny [a,b,c], Damien Paillot [b], Florent Colombet [a]

[a] Renault, DEA-TD, TCR AVA 013, 1 avenue du golf, 78280 Guyancourt, France
[b] Institut Image, Arts et Métier, LISPEN, CNRS, 2 rue Thomas Dumorey, France
[c] AVSimulation, 1 Cours de l'Île Seguin, 92100 Boulogne-Billancourt, France

ARTICLE INFO

Article history:
Received 22 October 2018
Received in revised form 8 November 2019
Accepted 24 November 2019
Available online xxx

Keywords:
Driving simulation
Simulator sickness
Motion sickness
Vibrations

ABSTRACT

Simulator sickness is a well-known side effect of driving simulation which may reduce the passenger well-being and performance due to its various symptoms, from pallor to vomiting. Numerous reducing countermeasures have been previously tested; however, they often have undesirable side effects. The present study investigated the possible effect of seat vibrations on simulator sickness. Three configurations were tested: no vibrations, realistic ones and some that might affect the proprioception. Twenty-nine participants were exposed to the three configurations on a four-minute long automated driving in a simulator equipped with a vibration platform. Simulator sickness was estimated thanks to the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) and to a postural instability measure. Results showed that vibrations help to reduce the sickness. Our findings demonstrate that some specific vibration configurations may have a positive impact on the sickness, thus confirming the usefulness of devices reproducing the road vibrations in addition to creating more immersion for the driver.

© 2019

UNCORRECTED PROOF

1. Introduction

In the past few years, driving simulators have been increasingly used in the automotive industry, such as for the testing of new interfaces or driver-assistance systems, and they will be even more used in the development of the future autonomous vehicles. Indeed, before their releases, these vehicles need to be validated over billions of kilometers to achieve the expected level of performance (Wachenfeld & Winner, 2016). Besides, the driving simulation with "Driver in the Loop" (DiL) will be one of the solutions to ease this process (Winkle, 2016), among massive digital simulations and real driving tests.

Nonetheless, the use of driving simulation can sometimes be limited by its well-known side effect the simulator sickness (Crowley, 1987; Kolasinski, 1995). This phenomenon is a specific form of motion sickness, which is quite similar to those that appear in virtual reality or transportation. Motion sickness is mainly due to the perception of movements and this not only concerns physical motions but also visual motions (Hettinger & Riccio, 1992). With varying susceptibility, most people suffer from motion sickness in their own way, except people without organs of balance who have been shown to be insensitive to both physical and visual motion (Golding, 2006; Reason & Brand, 1975). Motion sickness is mostly considered as a comfort issue in transports; however, in the case of driving simulation, it also affects task performance (Money, 1970) and limits the duration of the simulations because of its symptoms which can range widely from pallor to vomiting (Kennedy & Fowlkes, 1992). Although motion sickness has been extensively studied over the past decades, its causes and the mechanisms involved are not fully understood yet and several theories exist (Reason, 1978; Riccio & Stoffregen, 1991; Treisman, 1977). The most prominent, the sensory conflict and rearrangement, suggests that the sickness occurs when the information delivered by the visual, vestibular and somatosensory senses are not congruent with each other or with what is expected based on the internal models built from previous experiences (Reason, 1978).

E-mail addresses: guillaume.lucas@renault.com (G. Lucas); andras.kemeny@renault.com (A. Kemeny); damien.paillot@u-bourgogne.fr (D. Paillot); florent.colombet@renault.com (F. Colombet)

https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.11.011
1369-8478/© 2019.

Article Transport Research part F

Several countermeasures have already been investigated, like medication, which has been proved to be effective, but comes with significant side effects such as drowsiness, fatigue and impaired cognitive abilities (Benson, 2002; Zhang et al., 2016). Other behavioral methods have been tested, like habituation (Benson, 2002), restraint of the body (Chang, Pan, Chen, & Stoffregen, 2013), reduction of eye movements (Webb & Griffin, 2003), stroboscopic vision (Reschke, Somers, & Ford, 2006) and even pleasant music (Keshavarz & Hecht, 2014). They have also been shown to be effective to reduce motion sickness; however, their application can be limited because some are time-consuming and others may restrain the user or disturb him.

The goal of the present study was to investigate an alternative solution to reduce simulator sickness with some seat vibrations. Vibrations of the seat has already been suggested by M. McCauley and T. Sharkey in 1992 McCauley and Sharkey (1992), that it may be effective to reduce simulator sickness by providing noise to the vestibular and proprioceptive senses. However, Casali (1985) has shown that simple random vibrations alone is not enough to eliminate the sickness. Nonetheless, we know that motion sickness only occurs at motion frequencies below 1 Hz (O'Hanlon & McCauley, 1974), which are motion frequency, while higher vibrations frequencies are not sickening. Based on these assumptions, Bos (2015) proved that motion sickness due to low-frequency motion can be reduced by adding a high-frequency vibrations directly to the head, but not through the seat. However, providing vibrations to the head might not be feasible in some situations and can really disturb the driver. Seat vibrations, on the other hand, provides more proprioceptive cues and can influence the abdominal motion sensors, but could also deliver a subtle vestibular cue.

The first assumption is that some specific whole-body vibrations may disturb the senses, especially the vestibular and proprioceptive, which could have an impact on the simulator sickness. For example, the proprioceptive sense can be tricked by applying some specific vibrations (within the range of 60–100 Hz) on the muscles (Petroni, Carbajal, & Sigman, 2015; Bergenheim, Ribot-Ciscar, & Roll, 2000). This vibration can give the illusion of your body moving although he hasn't. These vibrations are also in a range where they can disturb the vestibular sense (Lackner & Graybiel, 1974).The hypothesis here was that these vibrations may give a small illusion of movement during the simulation, or, on the contrary, maybe disturb the senses and maybe make it worse. In addition to the first assumption, the effect of more realistic and consistent seat vibrations is also studied in the present study. They are more and more used in driving simulators and are known for improving the perception of speed (Sandin et al., 2016) and may deliver additional kinesthetic cues of speed and longitudinal accelerations. These cues will be in accordance with the visual perception of motion to the detriment of the vestibular information of no movements. Consequently, the sensory patterns should be more similar to the ones we are used to and the sensory conflict could be reduced and thus leading to less simulator sickness, according to the theory of Reason (1978). Consequently, we wanted to test whether different kinds of vibrations applied to the seat could have an influence on simulator sickness.

2. Methods

2.1. Experimental design

Three configurations of vibrations were considered in this study: first in the reference condition, no vibrations were rendered. In the second condition, realistic vibrations were rendered consistently with the simulation, thanks to the SCANeR Studio software and was based on the vehicle speed and the road surface. Then in the third condition, vibrations were rendered randomly in the frequency domain that can disturb the proprioception.

2.2. Simulator design

This study has been held at the Arts et Métiers ParisTech Institut Image in Chalon-sur-Saône on the SI2M simulator platform. This simulator platform consists of one car seat, pedals and steering wheel mounted on 4 D-BOX actuators (see Fig. 1). It was first designed to operate in a CAVE, but for this study we used the Oculus Rift CV1 Head-Mounted Display (HMD) for the visual and sound rendering. The D-BOX actuators system allows the platform a small liberty of movements in order to make the users feel the road (turn, speed bumps, etc.), but specially they are fast enough to generate vibrations to simulate the road contact (frequency ranges 0–100 Hz). This simulator is running thanks to three computers: one to manage the platform, the second to handle the visual rendering on the HMD and the last, the master, to manage the two others and handle the simulation, scenario, etc. The visual refresh rate was clocked to 75 Hz for the software (see Fig. 2).

2.3. Scenario design

The scenario has been developed with SCANeR Studio 1.7. participants were placed in an autonomous vehicle driving in a city environment and doing three tours of the same circuit (see Fig. 3) for a total duration of 3 min 45 s. The car was driving at 50 km/h with some slowdown at 30 km. All traffic lights were green so the car did not have to stop. Some other traffic cars were simulated on the road but no pedestrian. The participant was virtually immersed at the driver's seat of a Renault Scenic. The autonomous car accelerated at the beginning of the simulation with a slow acceleration of 1 m/s^2 and stopped at the end of the simulation with a deceleration of 1 m/s^2 also, so that the participant could put and remove the HMD in a car at a standstill.

UNCORRECTED PROOF

Article Transport Research part F

Fig. 1. SI2M Simulator.

Fig. 2. Visual overview of the driver vision.

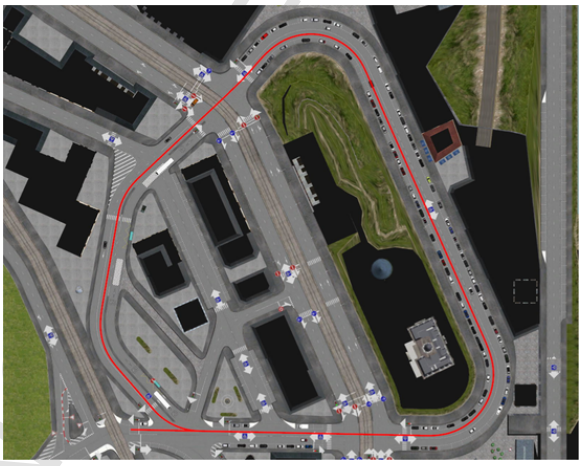


Fig. 3. Scenario circuit.

2.4. Realistic vibrations

For the generation of vibrations consistent with the virtual driving, we used a dedicated option of the SCANeR Studio driving simulation software. This option generates vibrations on the platform in addition to its movement. These vibrations depend on the road surface (granularity), the vehicle speed and the torque applied to the steering wheel. Moreover, this rendering also differentiates

UNCORRECTED PROOF

the left and the right. Vibrations are defined in the source code thanks to a Perlin noise method. During the experience the vehicle was on the asphalt and driving mostly at 50 km/h with some slowdowns at 30 km/h which gives the peaks frequency every 3.5 Hz with some higher at 21 Hz and 7 Hz (see Fig. 4).

2.5. Proprioceptive vibrations

As we have seen previously, the proprioception can be disturbed by vibrations in the range of 60–100 Hz. For this configuration we computed with Matlab software a white noise filtered with a band-pass filter in this range. The filter was set with a band pass from 60 to 100 Hz and the attenuation of 80 dB (Fig. 5). This computed vibrations lasted 5 s and were played in loop during the simulation.

3. Measurements

The simulator sickness was measured with two different procedures: a subjective one (questionnaires) and an objective one (measure of a physical state). Participants were asked to fill in a translated version of the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993; Bouchard, Robillard, & Renaud, 2007) before and after each configuration tested, to evaluate their level of simulator sickness due to each configuration. The SSQ is a standardized questionnaire which covers the wide range of simulator sickness symptoms (e.g., nausea, dizziness, fatigue, eyestrain, etc.) through 16 items that are judged on 4-point scales (not at all, slight, moderate, severe). The SSQ can be interpreted in three subscales (nausea, disorientation, oculomotor) and a total score. The participants were asked to fill out the questionnaire before each simulation to ensure that symptoms observed were not already there before the simulation.

Simulator sickness was also measured more objectively with the postural instability (Smart, Stoffregen, & Bardy, 2002; Kennedy & Fowlkes, 1992) using the Stabilotest balance board from Techno Concept (TechnoConcept, 2007). The measure was taken before and after each simulation in order to quantify the effect of the simulation on the postural instability. For this measure we recorded the mean area covered by the projection of the center of gravity on the ground. The participants were asked to keep their arms along the body, while looking straight forward at a target in front of them on the wall one meter away and trying to stand as still as possible during the measure. The recordings were made over a period of 51.2 s, at a sampling rate of 5 Hz in order to remain within the norms AFP 85.

In order to assess postural instability, we used two indicators, first, the spatial magnitude with the surface of the confidence ellipse containing 90% of the positions of the center of gravity (norm AFP 85). And also the multifractality of the displacement of postural sway (Munafo, Curry, Wade, & Stoffregen, 2016) using multifractal detrended fluctuation analysis, MF-DFA using open

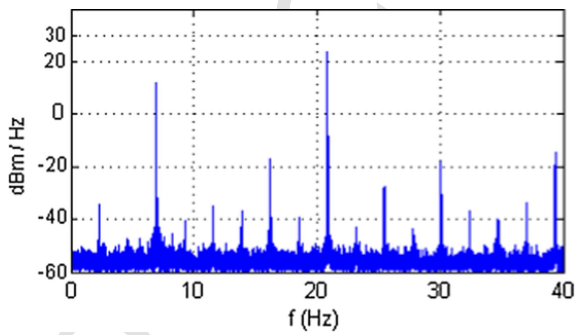


Fig. 4. Part of the power spectral density of the realistic vibrations.

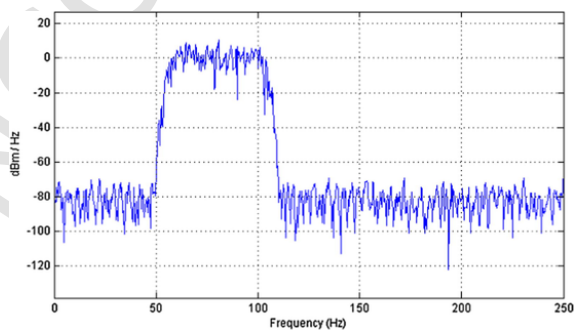


Fig. 5. Power spectral density of proprioceptive vibrations.

UNCORRECTED PROOF

source code for MATLAB (Ihlen, 2012). We have selected a minimum scaling range of 16 data points with 19 increasing segment sizes uniformly spaced up to the maximum of the time series length.

3.1. Participants

Thirty participants volunteered for this study, twenty-five men and six women, from 19 to 69 years old (Mean = 27.5; SD = 14.7). All the participants had their driving license, with various driving experience but most of them were regular drivers. Participants were informed about the purpose of the study and were free to abort the experiment at any time, especially if they felt too sick during one simulation. All the participants have driven in the three configurations separated by at least 6 h in order to avoid interference like sickness accumulation or habituation effects (Baltzley, Kennedy, Berbaum, Lilienthal, & Gower, 1989; Johnson, 2007), but most of the time there have been 24 h minimum between each condition. Configurations order was random among the participants in order to avoid rank effects.

4. Results

All statistical analyses have been computed thanks to the R project software. For the analysis we used the Wilcoxon paired Signed-Rank Test, a non-parametric test allowing comparison of the effects of a parameter on correlated samples (within subject design). We used a non-parametric test because the samples cannot be assimilated to a normal distribution. For each indicator we have analyzed the difference of the indicator before and after each simulation.

4.1. Simulator sickness questionnaire

The participants reacted very differently to the simulations.The population is scattered (mean ≈ standard deviation), some were not really affected by the simulation, but, on the other hand, some others were really affected and became quite sick. This also involves that the samples cannot be assimilated to a normal distribution, confirmed with a Shapiro–Wilk test of normality ($p_{without} = 1.5 \times 10^{-3}$; $p_{realistic} = 1.1 \times 10^{-4}$; $p_{proprioceptive} = 2.8 \times 10^{-4}$). This also confirms that we needed to keep the same participants through the three configurations to be able to compare the data.

Fig. 6 shows the different mean scores gathered by subscales scores of the SSQ depending on the configuration of vibrations. The most affected subscale is "Disorientation", followed by "Oculomotor".We observed a significant effect of vibrations reducing the symptoms of simulator sickness ($V = 406$ - $p_{w-c} = 1.94 \times 10^{-6}$; $V = 423$ - $p_{w-p} = 4.39 \times 10^{-6}$). However we can also observe a significant difference between the two types of vibrations ($V = 37$ - $p_{c-p} = 5{,}76 \times 10^{-3}$), with a reduction of 57% for the realistic vibrations and 47% for the proprioceptive one (see Figs. 7 and 8).

We can observe (Fig. 6) that symptoms of sickness is also reduced in all the three subscales of simulator sickness. The vibration not only affects the disorientation (−53%,−48%), which we thought will be the more affected. But also the nausea symptoms (−54%,−45%) and the oculomotor (−61%,−48%).

4.2. Postural instability measure

The postural instability also confirmed the SSQ test results, except for the difference between the two vibrations configurations. Like previously, the data cannot be assimilated to a normal distribution and a Shapirow-Wilks test confirms this assumption ($p_w = 0.00131$; $p_c = 0.178$; $p_p = 0.0363$). Like for the SSQ test results, any type of vibrations seemed to help to reduce the simulator sickness ($V = 381$ - $p_{w-c} = 8.72 \times 10^{-5}$; $V = 343.5$ - $p_{w-p} = 3.33 \times 10^{-6}$) nevertheless, no significant difference was found between the two vibrations configurations ($V = 166$ - $p_{c-p} = 0.137$).

The analyze of multifractality of the displacement of postural sway show the same kind of results. We can see that any type of vibrations seemed to help to reduce the augmentation of the width of the multifractal spectrum ($V = 395$ - $p_{w-c} = 9.523 \times 10^{-6}$

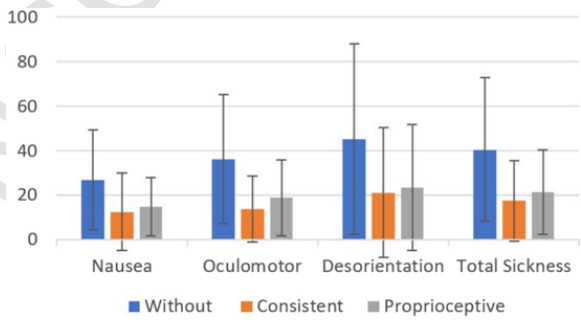


Fig. 6. Mean SSQ scores for each subscale with their standard deviation.

UNCORRECTED PROOF

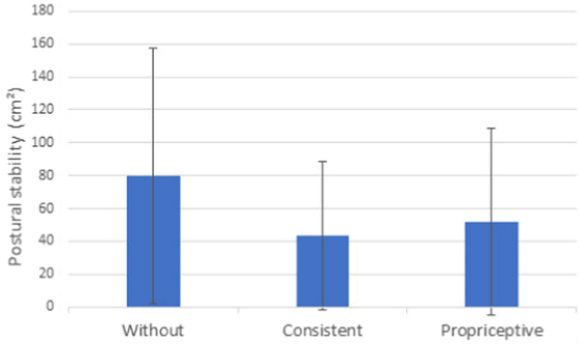


Fig. 7. Means and standard deviations of the difference of the surface of the postural sway.

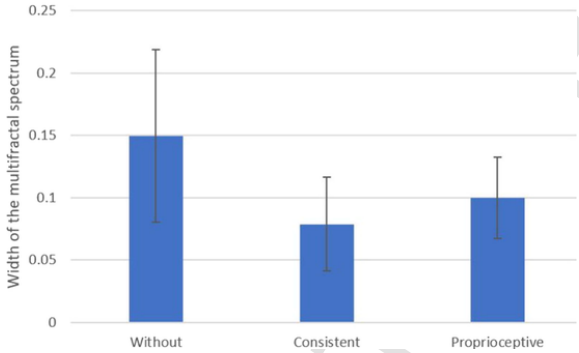


Fig. 8. Width of the multifractal spectrum and standard deviations of the postural sway.

; V = 355 - $p_{w-p} = 4.55 \times 10^{-5}$). As for the comparison between the two vibrations configurations isn't significant for the experiment (V = 195 - $p_{c-p} = 0.0735$).

5. Discussion

5.1. Main findings

The goal of this study was to investigate whether the seat vibrations could reduce the simulator sickness. Three configurations were compared: no vibrations, realistic ones and some that might affect the proprioception. Our findings show that some specific seat vibrations could alleviate the symptoms of simulator sickness, as indicated by reductions in the SSQ as well as in the postural instability measure. However, the difference between the two vibrations configuration was not really significant, even if the realistic vibrations has better scores. The remainder of this discussion will further elaborate on these results from different points of view.

5.2. Vibrations

As stated in the introduction, functioning organs of balance are essential in the origin of motion sickness, because people lacking them do not get sick from the motion. However, the vibrations were applied to the seat and not directly to the head like in the study of Bos (2015). In both studies, the frequency of the vibrations were well above 1 Hz, which is known to be the limit for causing sickness. Because the proprioception and the abdominal tissues may have a role in the genesis of motion sickness, we have here chosen to explore the effect of seat vibrations. As shown by the third configuration, vibrations in the range that can disturb the proprioception are effective to alleviate simulator sickness. Furthermore, in the second configuration with realistic vibrations, we can observe that some of their peaks vibrations density are in this range. Consequently, in addition to being consistent with reality, it may also affect the proprioception in a similar way than the third configuration.

Despite the vibrations were here applied to the seat and not directly to the head, the vestibular system is still affected by these vibrations. Indeed, even if the body acts as a shock absorber, here because the participant is seated there is just the high part of the spinal column that absorbs the vibrations before the head, even less if the participant put his head against the headrest. Thus, the sickness reduction may also be due to a similar effect than the one observed by Bos.

In static driving simulation, some disturbing moments are during the turns (Kolasinski, 1995). Several verbal reports from the participants show that noticed a disturbance at these moments in all three configurations but were the most disturbing in the

UNCORRECTED PROOF

first configuration when there was no vibration rendering. This seems to suggest that the vibrations are blurring the vestibular signals and they may have served as a mental distractor. This mental distractor can also explain the reduction of oculomotor symptoms which are mostly due to the visual system (Oculus Rift) which didn't change during the experimentation. The vibration may have distracted the participants who were less focus on the visual.

The motion sickness arises from conflicts between actual and expected sensory patterns. In simulation the vestibular and proprioceptive senses are not concordant to the visual one. Therefore, with the "proprioceptive vibrations" we are adding noises on this non-coherent sense. Consequently, their signals are less clear compared to the visual and so probably we tend to base our patterns more on the visual sense, which will create less sickness. For the "realistic vibrations" the patterns are more similar to ones we are used and tend to create less sickness. In addition, the realistic vibrations add a kinesthetic sense of the speed and the linear accelerations which will reinforce the visual information of speed and accelerations to the detriment of the vestibular information.

As we have seen, there was no significant difference on the postural instability measure between the two configurations with vibrations. Nonetheless, the participants found the third configuration less pleasant although it is not supported by significant results either. Since the scenario was quite short (≈4 min) it could explain why the difference was not significant. But with a longer simulation the "annoying" effect of the proprioceptive vibrations could induce a significant less comfortable feeling. The link with motion sickness is yet to be proved and validated in further experiments.

5.3. General remarks

As shown in the results, the significance of the postural instability measures was lesser than the SSQ scores, especially between the two types of vibrations where there is no significant difference, this difference could be due to the seated position of the participants during the simulation. Indeed, in this position, the postural control is less used because instability movements are limited. For this reason, the adaptation of the postural control (Riccio & Stoffregen, 1991) is reduced which led to less instability after the simulation and specially during the measurement.

Also the postural stability could have been disturbed by the vibrations pattern, not only by the simulator sickness. Indeed whole body vibration training is used for improving or correcting the postural control of peoples affected by different medical problems (Bogaerts, Verschueren, Delecluse, Claessens, & Boonen, 2007; van Nes, Geurts, Hendricks, & Duysens, 2004). This fact may reduce the significance of the postural instability measure for this kind of experimentation. On the other hand, these studies show an improvement of postural sway after exposition to whole body vibration, so based on the theory of Stoffregen and Smart (1998), the motion sickness comes from prolonged postural instability, this effect could also reduce the motion sickness after the simulation.

Even though the visual refresh rate was clocked to 75 Hz, we observe some decreased rate during the simulation (≈50 Hz). This phenomenon could have induced more sickness specially in the "Oculomotor" SSQ subscale.

Many participants, in their feedback, raised the issue of the turns, they find them very disturbing and quite sickening. Indeed our realistic vibrations give some cues about the speed and the longitudinal accelerations, but not for transverse accelerations, which are mostly due the turns. Thus, for future experimentation, it may be interesting to add some other haptic cues for the turns by moving the vibrations to one side or another during the turns.

6. Conclusion

The present study investigated the effects of seat vibrations in driving simulation and more specifically its role as a countermeasure against simulator sickness. Our findings showed that some specific vibration configurations have a positive impact. This study thus confirms the usefulness of devices reproducing road vibrations in driving simulation, not only for the driver immersion but also to reduce simulator sickness occurrence and severity.

References

Baltzley, D. R., Kennedy, R. S., Berbaum, K. S., Lilienthal, M. G., & Gower, D. W. (1989). The time course of postflight simulator sickness symptoms. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 60(11), 1043–1048.

Benson, A. J. (2002). Motion sickness. In K.B. Pandof, R.E. Burr, editors. Medical aspects of harsh environments, vol. 2, Chap 35, 2002, ISBN 978-0-16-051184-4 (pp. 1048–1083).

Bergenheim, M., Ribot-Ciscar, E., & Roll, J. P. (2000). Proprioceptive population coding of two-dimensional limb movements in humans: I. Muscle spindle feedback during spatially oriented movements. Experimental Brain Research, 134(3), 301–310.

Bogaerts, A., Verschueren, S. M. P., Delecluse, C., Claessens, A. L. M., & Boonen, S. (2007). *Effects of whole body vibration training on postural control in older individuals: A 1 year randomized controlled trial*, vol. 26(2) (pp. 309–316).

Bos, J. E. (2015). Less sickness with more motion and/or mental distraction. Journal of Vestibular Research, 1, 23–33.

Bouchard, S., Robillard, G., & Renaud, P. (2007). Revising the factor structure of the Simulator Sickness Questionnaire. Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine, 5(Summer), 128–137.

Casali, J. G. (1985). Vehicular Simulation-Induced Sickness. Volume 1. An Overview., Tech. Rep. IEOR-8501, Virginia Polytechnic Inst And State Univ.

Chang, C.-H., Pan, W.-W., Chen, F.-C., & Stoffregen, T. A. (2013). Console video games, postural activity, and motion sickness during passive restraint. Experimental Brain Research, 229(2), 235–242.

Crowley, J. S. (1987). Simulator sickness: A problem for Army aviation. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 58(4), 355–357.

Ihlen, E. A. F. (2012). Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in Matlab. Frontiers in Physiology, 3.

Golding, J. F. (2006). Motion sickness susceptibility. Autonomic Neuroscience, 129(1–2), 67–76.

Hettinger, L. J., & Riccio, G. E. (1992). Visually induced motion sickness in virtual environments. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1(3), 306–310.

Johnson, D. M. (2007). Simulator Sickness Research Summary. *Tech. rep., Army research inst for the behavioral and social sciences fort rucker al.*

Kennedy, R. S., & 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., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. The International Journal of Aviation Psychology, 3(3), 203–220.

UNCORRECTED PROOF

Article Transport Research part F

Keshavarz, B., & Hecht, H. (2014). Pleasant music as a countermeasure against visually induced motion sickness. Applied Ergonomics, 45(3), 521–527.
Kolasinski, E. M. (1995). Simulator Sickness in Virtual Environments., Tech. Rep. No. ARI-TR-1027, Army research inst for the behavioral and social sciences Alexandria VA.
Lackner, J. R., & Graybiel, A., (1974). Elicitation of Vestibular Side Effects by Regional Vibration of the Head,, Tech. Rep. NAMRL-1204, Naval aerospace medical research lab Pensacola FL, naval aerospace medical research lab Pensacola FL.
McCauley, M., & Sharkey, T. (1992). Cybersickness: Perception of self-motion in virtual environment. Presence, 1, 311–318.
Money, K. E. (1970). Motion sickness. Physiological Reviews, 50(1), 1–39.
Munafo, J., Curry, C., Wade, M. G., & Stoffregen, T. A. (2016). The distance of visual targets affects the spatial magnitude and multifractal scaling of standing body sway in younger and older adults. Experimental Brain Research, 234(9), 2721–2730.
van Nes, I. J. W., Geurts, A. C. H., Hendricks, H. T., & Duysens, J. (2004.) *Short-Term Effects of Whole-Body Vibration on Postural Control in Unilateral Chronic Stroke Patients: Preliminary Evidence*, vol. 83(11): 867.
O'Hanlon, J. F., & McCauley, M. E. (1974). Motion sickness incidence as a function of the frequency and acceleration of vertical sinusoidal motion. Aerospace Medicine, 45(4), 366–369.
Petroni, A., Carbajal, M. J., & Sigman, M. (2015). Proprioceptive body illusions modulate the visual perception of reaching distance. PLOS ONE, 10(6), e0131087.
Reason, J., & Brand, J. (1975). Motion sickness: vii. Oxford, England: Academic Press. ISBN 978-0-12-584050-7.
Reason, J. T. (1978). Motion sickness adaptation: A neural mismatch model. Journal of the Royal Society of Medicine, 71(11), 819–829.
Reschke, M., Somers, J., & Ford, G. (2006). Stroboscopic vision as a treatment for motion sickness: Strobe lighting vs. shutter glasses. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 77, 2–7.
Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1991). An ecological theory of motion sickness and postural instability. Ecological Psychology, 3(3), 195–240.
Sandin, J. F. M., Erikson L., & Augusto, B. (2016). Effects of sensory cues on perceived simulated speed. DSC 2016 Europe, (pp. 171–178).
Smart, L. J., Stoffregen, T. A., & Bardy, B. G. (2002). Visually induced motion sickness predicted by postural instability. Human Factors, 44(3), 451–465.
Stoffregen, T. A., & Smart, L. J. (1998). Postural instability precedes motion sickness, vol. 47(5): (pp. 437–448).
TechnoConcept, Techno-concept balance board manual.
Treisman, M. (1977). Motion sickness: An evolutionary hypothesis. Science, 197(4302), 493–495.
Wachenfeld, W., Winner, H. (2016). The release of autonomous vehicles. In Autonomous Driving, 425–449, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016, ISBN 978-3-662-48845-4 978-3-662-48847-8.
Webb, N. A., & Griffin, M. J. (2003). Eye movement, vection, and motion sickness with foveal and peripheral vision. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 74(6), 622–625.
Winkle, T. (2016). Safety benefits of automated vehicles: Extended findings from accident research for development, validation and testing. In M. Maurer, J.C. Gerdes, B. Lenz, H. Winner, editors. Autonomous Driving, 335–364, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016, ISBN 978-3-662-48845-4 978-3-662-48847-8.
Zhang, L.-L., Wang, J.-Q., Qi, R.-R., Pan, L.-L., Li, M., & Cai, Y.-L. (2016). Motion sickness: Current knowledge and recent advance. CNS Neuroscience & Therapeutics, 22(1), 15–24.

UNCORRECTED PROOF

ANNEXES DE L'ÉTUDE : CORRECTION DE L'ÉCART DE LATENCE

Questionnaire préliminaire

Participant : _____ Expé : ___

,

Sexe : H / F

Age : _____

Étiez-vous stressé avant la première simulation (appréhension etc) ?_____

Avez-vous le permis ? _____ Année : _____

Si oui êtes-vous un conducteur régulier ?

0	1	2	3	4

Pas du tout À chaque fois

Êtes-vous souvent malade dans les transports ?

0	1	2	3	4

Pas du tout À chaque fois

Êtes-vous un joueur de jeux-vidéo ?

0	1	2	3	4

Pas du tout À chaque fois

Êtes-vous familier avec la réalité virtuelle/simulateurs ?

0	1	2	3	4

Pas du tout À chaque fois

Avez-vous senti une différence entre les 2 conduites ? Si oui laquelle avez-vous préférée ? et pourquoi ?

_____
_____
_____
_____

Commentaires / remarques / observations :

_____
_____
_____
_____

Questionnaire de ressenti

Participant : _____ Expé : ___

,

Dans quel mesure vos sens étaient-ils trompés par le réalisme du mouvement ?

0	1	2	3	4

Pas du tout Très trompés

Dans quel mesure l'expérience que vous avez vécu dans l'environnement virtuel ressemblait-elle a celle de l'environnement réel ?

0	1	2	3	4

Pas ressemblant Très ressemblant

Jusqu'à quel point la sensation de déplacement à l'intérieur de l'environnement virtuel était-elle confondante (réaliste) ?

0	1	2	3	4

Pas du tout Très confondante

Jusqu'à quel point étiez-vous impliqué(e) dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel ?

0	1	2	3	4

Pas du tout engagé(e) Complètement absorbé(e)

À quel rythme vous êtes-vous adapté(e) à l'expérience vécue dans l'environnement virtuel ?

0	1	2	3	4

Pas adaptée du tout en moins d'une minute

Jusqu'à quel point avez-vous ressenti un délai séparant ressenti physique des accélérations et leur effet le visuel ?

0	1	2	3	4

Aucun délai long délai

A quel point l'expérience vous a été perturbante/ dérangeante ?

0	1	2	3	4

Pas du tout Désagréable

Confidential C

Questionnaire SSQ

Participant : _____ Exp : ___

,

Consignes : Cochez à quel point chaque symptôme ci-dessous vous affecte présentement.

	Pas du tout	Un peu	Modérément	Sévèrement
1. Inconfort général				
2. Fatigue				
3. Mal de tête				
4. Fatigue des yeux				
5. Difficulté à faire le focus				
6. Augmentation de la salivation				
7. Transpiration				
8. Nausées				
9. Difficulté à se concentrer				
10. Impression de lourdeur dans la tête				
11. Vision embrouillée				
12. Étourdissement les yeux ouverts				
13. Étourdissement les yeux fermés				
14. Vertiges[1]				
15. Conscience de l'estomac[2]				
16. Rots				

[1] Les vertiges sont vécus comme une perte de l'orientation par rapport à la position verticale.

[2] L'expression « conscience de l'estomac » est habituellement utilisée pour désigner un sentiment d'inconfort sans nausée.

Poster DSC 2019

GROUPE RENAULT

Study of latency gap corrections in a dynamic driving simulator

Guillaume Lucas[1,2], Florent Colombet[1], Andras Kemeny,[1,2] ,Damien Paillot[2]

(1) Renault Group, Guyancourt, France, e-mail: {guillaume.lucas, florent.colombet, andras.kemeny}@renault.com

(2) Arts et Métiers ParisTech, LISPEN, Institut Image, Chalon-sur-Saône, e-mail: {guillaume.lucas, andras.kemeny, damien.paillot}@ensam.eu

Context and problematic

The use of driving simulation may be limited by its well-known side effect the simulator sickness. This phenomenon is a specific form of motion sickness, which is quite similar to those that appear in virtual reality or transportation. Motion sickness is mostly considered as a comfort issue in transports; however, in the case of driving simulation, it also affects task performance and limits the duration of the simulations because of its symptoms which can range widely from pallor to vomiting [Ken93].

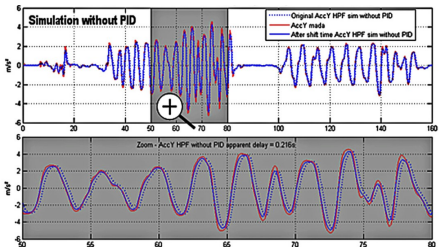
In this study we intend to study a cause of discrepancies between visual and physical motion rendering, observing that there is a latency gap in dynamic driving simulators between the visual and the motion. Indeed, as motion systems and the visual system have different delays, the difference between the two creates a latency gap which could be a cause to simulator sickness, because of the non-coherent sensory stimulation [Rea78].

Hypothesis : by adding a pure visual delay to compensate the mechanical delay we will increase the motion coherence and then potentially decrease the induced simulator sickness.

Methodology

1. **Measurement of the motion delay**

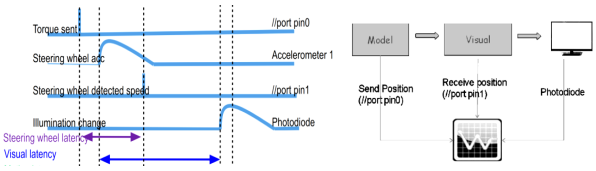
   The measurement of the delay of the Renault Ultimate motion system has already been done in a previous study [Fan10] . The apparent response lag of a computer-controlled actuator system is generally composed of two terms: a pure delay and a phase delay. These delays have been measured thanks to the software Spymove specially developed for that and an inertial unit. The results have been measured at 0,2 Hz and show a delay of 220 ms, this delay may vary a bit depending on the frequency.



Profile Slalom, motion system command vs real profile [Fan10]

2. **Measurement of the visual delay**

   The visual delay has been measured thanks to a specific tool from AVSimulation for measuring the delays of dynamic simulators running with SCANeR [Sai10]. It is composed of an oscilloscope connected to the supervisor computer and connected to the projector and a photodiode placed near the lens of the projector. The vehicles dynamics model periodically toggles between a vehicle position corresponding to a bright area of the database and a dark area, causing a sudden change in the projector intensity easily measurable by the photodiode. Simultaneously the vehicles dynamics model signals the position to the oscilloscope. The delay measured for the visual system is around 75 ms.

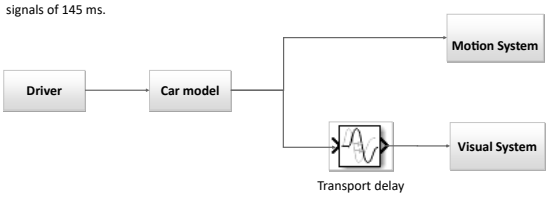


Measuring the delays [Sai10]

3. **Correction of the latency gap**

   As we saw in the two previous paragraphs the visual and the motion systems have different delays which creates a latency gap of 145 ms. The only way the correct it and create coherent sensory stimulation is to add a 145 ms transport delay on the signals of the visual system.

   The correction of the latency gap has been made thanks to a Matlab model. This module has been added at the end of the simulation computation and adds a transport delay on the visual signals of 145 ms.



Experimental protocol

1. **Simulator setup**

   The experiment took place at Renault in the Ultimate dynamic simulator with the following main capabilities:

   - A motion system with 8 degrees of freedom: a 6 DOF platform and two X-Y rails
   - A full cabin equipped with force feedback systems on the steering wheel and the pedals.
   - A cylindrical screen covering 210° of horizontal field-of-view and attached to the cabin
   - Sound rendering is made inside the cabin.

2. **Scenario**

   The subjects had to perform two driving sessions, one with the latency correction and the other without. These conditions were set in a random order, between subjects, to avoid rank effect and habituation. All the driving sessions were separated by at least 18 hours to avoid the accumulation effect.

   The simulation scenario has been developed on SCANeR Studio 1.8. Subjects were placed in autonomous mode, on the N104 highway at 110 km/h, for around 10 minutes.

3. **Measurement of the motion sickness**

   The motion sickness has been evaluated with the simulator sickness questionnaire (SSQ) [Ken93] before and after each session.

   At the end of each session they also had to fill out a questionnaire reporting their feelings about the driving session.

Results and discussion

For now 24 subjects have done the experimentation, we don't have yet the results but from the comments of the participants, this correction seems to have a good impact. The subjects seem to feel a bit less sick or disturbed by the driving sessions with the correction. Some even felt an enhancement on some gaze disturbance they encountered without correction during the strong accelerations.

Here we have 145 ms of latency gap, which is quite big for a simulator. This could be almost imperceptible for a standard driver but can create motion sickness after long driving sessions or visual disturbances during certain driving maneuvers. With the correction we have a global delay around 220 ms, which is hard for a standard driver to perceive, especially here in autonomous driving. The drivers were not active on the car comportment, so the global delay is quite transparent for them. In further studies we want to perform some tests in manual driving to study the impact of this delay.

References

Z. Fang, and all, 2010, **Performance Identification and Compensation of Simulator Motion Cueing Delays.** *DSC Europe 2010*

R. S. Kennedy, and all, 1993, **Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness.** *The International Journal of Aviation Psychology*

E. Kolasinski, 1995, **Simulator Sickness in Virtual Environments.**

J. T. Reason, 1978, **Motion sickness adaptation: a neural mismatch model.** *Journal of the Royal Society Medecine*

F. Saidi, G. Millet and G. Gallée, 2010, **Transport Delay Characterization of SCANeR Driving Simulator.** *DSC Europe 2010*

ANNEXES DE L'ÉTUDE : MESURE DU RÉFLEXE VESTIBULO-OCULAIRE

Aperçu du questionnaire

Questionnaire : Expérience de mesure oculaire en simulation

Questionnaire anonyme accompagnant la campagne de mesure oculaire en simulation, sur le simulateur Renault Ultimate.

***** Obligatoire

1. Sexe *

- ◯ Homme
- ◯ Femme
- ◯ Autre

2. Avez vous une correction de vue ? *

- ◯ Non
- ◯ Oui mais pas pendant l'expé
- ◯ Oui et pendant l'expé

3. Age *

La valeur doit être un nombre

Aperçu du questionnaire

4. Nombre d'années de permis *

La valeur doit être un nombre

5. Etes vous un conducteur régulier ? *

	1	2	3	4	5	
Conduit très rarement	◯	◯	◯	◯	◯	Conduit tout les jours

6. Etes vous souvent malade en transports ? *

	1	2	3	4	5	
Jamais	◯	◯	◯	◯	◯	Tout le temps

7. Etes vous joueur de jeux-vidéos ? *

	1	2	3	4	5	
Jamais	◯	◯	◯	◯	◯	Régulièrement

8. Etes vous familier avec la réalité virtuelle ou les simulateurs ? *

	1	2	3	4	5	
Jamais essayé	◯	◯	◯	◯	◯	Pratique régulièrement

Aperçu du questionnaire

9. Avez-vous senti une différence entre les 3 configurations de conduite ? *

   Si oui, décrivez lesquelles

10. Avez vous ressenti les inclinaisons de la cabine du simulateur ? *

    Si oui, sur quelles configurations ?

11. Commentaire / Remarques / Observations

    N'hésitez pas sur vos moindre impressions

Aperçu du questionnaire

Ce contenu n'a pas été créé ni n'est approuvé par Microsoft. Les données que vous soumettez sont envoyées au propriétaire du formulaire.

Microsoft Forms

RÉDUCTION DU MAL DU SIMULATEUR LORS DE LA SIMULATION LONGUE DURÉE POUR LA VALIDATION DE VÉHICULES AUTONOMES

RESUME : Le véhicule autonome est considéré comme l'une des innovations majeures de ces prochaines décennies. Il est donc crucial de pouvoir évaluer et valider en amont les systèmes intelligents complexes mis en jeux dans ces futurs véhicules ainsi que leurs interactions avec le conducteur. C'est pourquoi les outils de simulation sont privilégiés afin de pouvoir réaliser les milliards de kilomètres de roulage nécessaire, ainsi que les cas critiques, sans mettre en danger les usagers. La simulation de conduite driver-in-the-loop sera particulièrement utile afin d'étudier et de valider les phases de conduite hybride, comme la délégation ou la reprise de conduite par le conducteur. Cependant, l'utilisation des simulateurs de conduite immersifs est notamment limitée par le mal du simulateur. En effet, ce phénomène similaire au mal des transports peut affecter les performances et la tâche du conducteur, ainsi que limiter le temps de simulation.

Cette thèse « Réduction du mal du simulateur lors de la simulation longue durée pour la validation de véhicules autonomes » a été réalisée dans le cadre d'un contrat CIFRE établi entre les Arts et Métiers d'une part et le groupe Renault d'autre part. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à comprendre ce phénomène à travers la littérature. Nous nous sommes particulièrement intéressés à ses origines ainsi qu'aux différents facteurs pouvant influer sur celui-ci. Ces analyses nous ont permis d'identifier différents leviers pouvant permettre de réduire le mal du simulateur. Nous réalisons, dans un second temps, une série d'expérimentations afin de tester et mettre en place nos solutions retenues. La première s'intéresse à l'effet d'ajout de modalités vibratoires de la cabine. La seconde expérience s'applique à corriger un écart de latences entre la dynamique et le visuel. Finalement, la dernière étude s'intéresse aux déclenchements de réflexes oculaires inattendu, par les algorithmes de contrôle de mouvement.

La thèse présentera les résultats expérimentaux de la réduction des symptômes de mal du simulateur par l'intégration de vibrations ou de compensation de latences. Elle exposera également le déclenchement inopiné de mécanismes oculomoteurs pouvant être source d'oscillopsies, voire de symptômes de cinétose. Permettant ainsi des pistes d'améliorations significatives du mal de simulateur, afin de mener les campagnes d'analyses et de validation du véhicule autonome.

Mots clés : Mal du simulateur, Simulation driver-in-the-loop, Véhicule autonome

REDUCTION OF SIMULATOR SICKNESS DURING LONG-TERM SIMULATION FOR THE VALIDATION OF AUTONOMOUS VEHICLES

ABSTRACT : Autonomous vehicles are considered to be the major innovation vehicle of the coming decades. It is therefore crucial to be able to assess and validate upstream the complex intelligent systems involved in these future vehicles as well as their interactions with the driver. This is why simulation tools are favored in order to be able to carry out the billions of kilometers of driving required, as well as critical cases, without endangering users. The driving simulation driver-in-the-loop will be particularly useful in order to study and validate the phases of hybrid driving, such as the delegation or resumption of driving by the driver. However, the use of immersive driving simulators is particularly limited by the simulator sickness. Indeed, this phenomenon, similar to motion sickness, can affect the driver's performance and task of the driver, as well as limit the simulation time.

This thesis « Reducing simulator sickness during long-term simulation for autonomous vehicle validation » was carried out within the framework of a CIFRE contract between Arts et Métiers on the one hand and the Renault group on the other hand. First, we were interested in understanding this phenomenon through the literature. We were particularly interested in its origins as well as the various factors that can influence it. These analyzes allowed us to identify different levers that could allow us to reduce the simulator sickness. We then carry out a series of experiments in order to test and implement our chosen solutions. The first experiment focuses on the effect of adding vibratory modalities of the cabin. The second one applies to correct a latency gap between the dynamics and the visual. Finally, the last study is interested in the possible triggering of unexpected ocular reflexes by motion control algorithms.

The thesis will present the experimental results of the diminution of symptoms ofsimulator sickness through the integration of vibrations or compensation of latencies. It will also expose the unexpected triggering of oculomotor mechanisms that can be a source of oscillopsias, or even symptoms of motion sickness. Thus allowing avenues for significant improvements of simulator sickness, in order to conduct autonomous vehicle analysis and validation campaigns.

Keywords : Simulator sickness, Driver-in-the-loop simulation, Autonomous vehicle.

Arts et Métiers Sciences et Technologies

HESAM UNIVERSITÉ