



HAL
open science

Facteur d'échelle visuelle pour la restitution de la perception de vitesse en simulation de conduite automobile

Florent Colombet

► **To cite this version:**

Florent Colombet. Facteur d'échelle visuelle pour la restitution de la perception de vitesse en simulation de conduite automobile. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Arts et Métiers ParisTech, 2010. Français. NNT : 2010ENAM0043 . pastel-00546257

HAL Id: pastel-00546257

<https://pastel.hal.science/pastel-00546257>

Submitted on 14 Dec 2010

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.

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

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Informatique "

présentée et soutenue publiquement par

Florent COLOMBET

le 13 décembre 2010

**Facteur d'échelle visuelle pour la
restitution de la perception de vitesse
en simulation de conduite automobile**

Directeur de thèse : **Frédéric MERIENNE**

Co-encadrement de la thèse : **Andras KEMENY, Damien PAILLOT**

Jury

M. Marc NEVEU, Professeur, Le2i, Université de Bourgogne
M. Stéphane ESPIE, Directeur de Recherche, LEPSIS, INRETS
M. Daniel MESTRE, Directeur de Recherche, CNRS, Institut des Sciences du Mouvement
M. Frédéric MERIENNE, Professeur, Institut Image, Arts et Métiers ParisTech
M. Andras KEMENY, Professeur Associé, Renault, Arts et Métiers ParisTech
M. Damien PAILLOT, Maître de Conférences, Institut Image, Arts et Métiers ParisTech

Président
Rapporteur
Rapporteur
Directeur
Co-encadrant
Co-encadrant

**T
H
È
S
E**

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le fruit d'un travail collectif, et il est donc juste qu'y figurent les noms de tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail et à sa bonne réussite.

Je tiens à remercier en premier lieu M. Frédéric Mérienne pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse en acceptant d'en prendre la direction. Je remercie également MM. Andras Kemeny et Damien Paillot pour le co-encadrement de mes travaux. Je les remercie tous les trois pour la confiance qu'ils m'ont accordée en me laissant une très grande liberté d'exploration.

Je remercie également tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ma thèse. J'en suis très honoré. Je tiens à remercier tout spécialement MM. Stéphane Espié et Daniel Mestre qui ont très volontiers accepté d'être rapporteurs.

Cette thèse a débuté par la construction d'un simulateur, SAAM, dont je suis très fier d'avoir participé activement à l'élaboration. Je tiens à ce propos à remercier très chaleureusement tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce projet, et particulièrement :

- Le Grand Chalon, l'Etat (à travers le FNADT), Arts et Métiers ParisTech et Renault pour leurs financements ;
- tous les membres du Centre Technique de Simulation de Renault, spécialement Serge Vallée et David Toffin, mais aussi Didier Leclerc et Daniel Boscher, pour leur implication et leur dévouement quotidien ;
- toutes les personnes de la société Techniforme pour le remarquable travail qu'ils ont accompli ;
- Emmanuel Follin, Guillaume Drieux, Yohann Chalumeaux et Alain Pons de la société Oktal pour leur support ;
- Christian Père, pour ses conseils, sa sympathie et son expérience.

Je remercie également tous les sujets qui ont participé aux expérimentations sur simulateur présentées dans cette thèse. C'est à eux que je dois les résultats obtenus.

Un grand merci à Nicolas Filliard, pour tout le temps qu'il m'a accordé et toutes les discussions autour de la recherche et de la simulation de conduite que nous avons eues lors de ses venues à Chalon-sur-Saône. Je lui en suis très reconnaissant.

Le cadre de travail étant un élément essentiel à la bonne réussite d'un projet, je tiens à remercier tous mes collègues de Chalon-sur-Saône et également de Cluny (que l'on a malheureusement trop tendance à oublier parfois). Je remercie en particulier Géraldine pour sa disponibilité et sa gentillesse, mais également Philippe, Alexandre « Choco », Guillaume « Babahoo », Jérémie, Jean-Luc, Christian, Sébastien G, Eddy, Sébastien F...

Je remercie également tous les collègues des sociétés Longcat et On-Situ, pour leur accueil « caféiné » et leur présence pendant les vacances : Jean-Pierre, Clément, Manu, Fabien, Seb, Tony...

J'ajoute un remerciement particulier à Jean-Pierre et Philippe, en souvenir de toutes les pauses café que l'on a pu prendre ensemble, ainsi qu'à Manu, Jean-Pierre et Choco, en souvenir de toutes les soirées vidéoludiques chalonnaises que l'on a partagées.

Je tiens à remercier Adrien, Benjamin, Emmanuelle, Nicolas, Renaud et Slim car lors de mon passage au Technocentre Renault, avant même de commencer cette thèse, ils ont su me donner goût à la recherche. Je remercie également les docteurs Daniel Jackson, Samantha Carter, Leonard Hofstadter, Rajesh Koothrappali et Sheldon Cooper pour avoir su entretenir chez moi cette passion pour la recherche.

Enfin, “last but not least”, je tiens à remercier tous les membres de ma famille : Rémi, mon père, Anne-Rose, ma mère, Amélie, Alexia et Laura, mes sœurs et également Sarah, ma fiancée, et ses parents, Christian et Béatrice, pour leur soutien et leurs encouragements jusqu’aux derniers instants de cette thèse. Merci en particulier à ma chérie pour tout le temps, le soutien et le réconfort qu’elle a su m’apporter, et la patience qu’elle a montré à mon égard, surtout pendant les derniers mois de rédaction.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
TABLE DES MATIÈRES.....	III
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	VII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1. Pourquoi simuler la conduite ?.....	1
1.2. Percevoir et restituer le mouvement.....	2
1.3. Contexte de l'étude.....	4
1.4. Problématique et Plan de lecture.....	5
1.4.1. Problématique.....	5
1.4.2. Plan de lecture.....	6
CHAPITRE 2 VOIES SENSORIELLES POUR LA PERCEPTION DU MOUVEMENT.....	9
2.1. Introduction.....	9
2.2. Modalité visuelle.....	10
2.2.1. Description générale de l'oeil.....	10
2.2.2. Description de la rétine.....	11
2.2.3. Conclusion.....	15
2.3. Modalité vestibulaire.....	16
2.3.1. Les canaux semi-circulaires.....	17
2.3.2. Les organes otolithiques : le saccule et l'utricule.....	22
2.3.3. Seuils de détection.....	26
2.3.4. Conclusion.....	26
2.4. Somesthésie ou modalité somatosensorielle.....	27
2.4.1. Le toucher.....	27
2.4.2. Proprioception.....	28
2.4.3. Conclusion.....	28
2.5. Interactions multisensorielles.....	29
2.5.1. Interactions visuo-vestibulaires.....	29
2.5.2. Activités réflexes vestibulaires, réflexe vestibulo-oculaire.....	29
2.5.3. Conclusion.....	31
2.6. Conclusions.....	31
CHAPITRE 3 PERCEPTION DU MOUVEMENT PROPRE.....	33
3.1. Perception visuelle du mouvement.....	33
3.1.1. Flux optique, flux rétinien.....	33
3.1.2. Flux optique et vitesse perçue.....	37
3.1.3. Perception des distances.....	40
3.2. Interactions multisensorielles pour la perception du mouvement propre.....	44
3.2.1. La vection.....	44
3.2.2. Distinction entre mouvement propre et mouvement d'objets.....	47
3.2.3. Conflits sensoriels et mal du simulateur.....	49
3.3. Conclusion.....	50
CHAPITRE 4 RESTITUTION DU MOUVEMENT EN SIMULATION DE CONDUITE.....	51
4.1. Les simulateurs de conduite.....	51
4.1.1. Simuler le vol versus simuler la conduite.....	51

4.1.2.	Evolution des simulateurs de conduite automobile.....	52
4.2.	Restituteurs sensoriels	59
4.2.1.	Restitution visuelle	59
4.2.2.	Restitution inertielle.....	61
4.2.3.	Restitutions sonores et somatosensorielles.....	66
4.3.	Architectures logicielles employées	68
4.3.1.	Les différents éléments d'un logiciel de simulation	68
4.3.2.	Exemple de SCANer©.....	69
4.3.3.	Exemple de openSimulation.....	70
4.3.4.	Stratégies de commande.....	70
4.3.5.	Synthèse d'image	74
CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET PROBLÉMATIQUE.....		79
CHAPITRE 5 COMMENT « CORRIGER » LA VITESSE PERÇUE ?.....		81
5.1.	Modification de la vitesse perçue par modification du champ de vision géométrique	81
5.1.1.	Preuves expérimentales.....	81
5.1.2.	Hypothèse explicative	84
5.1.3.	Objectifs de l'étude proposée	86
5.2.	Le simulateur de conduite SAAM	87
5.2.1.	Présentation générale	87
5.2.2.	Le cockpit.....	88
5.2.3.	Restitution visuelle	90
5.2.4.	Restitution inertielle.....	91
5.3.	Mesure expérimentale de l'influence du facteur d'échelle visuelle sur la perception de la vitesse longitudinale 93	
5.3.1.	Environnement virtuel	93
5.3.2.	Expériences préliminaires	93
5.3.3.	Procédure expérimentale.....	95
5.3.4.	Résultats.....	96
5.3.5.	Discussion	98
5.3.6.	Conclusions de l'étude expérimentale	100
5.4.	Conclusion et implications pour la simulation de conduite	101
5.4.1.	Loi de variation de la vitesse perçue	101
5.4.2.	Vers une utilisation dynamique du facteur d'échelle visuelle	101
CHAPITRE 6 UTILISATION DYNAMIQUE DU FACTEUR D'ÉCHELLE VISUELLE. 103		
6.1.	Motivations de l'étude et problématique	103
6.2.	Méthodes psychophysiques pour la mesure de seuils de détection	105
6.2.1.	Généralités sur la psychophysique.....	105
6.2.2.	Les méthodes existantes	106
6.3.	Correction de l'image en temps réel	110
6.3.1.	Position du problème	110
6.3.2.	Résolution du problème	111
6.3.3.	Implémentation de la solution	113
6.4.	Mesure expérimentale du seuil de perception du changement de facteur d'échelle visuelle ..	114
6.4.1.	Procédure expérimentale.....	114
6.4.2.	Environnement virtuel	115
6.4.3.	Evolution du protocole.....	119
6.4.4.	Résultats.....	122
6.4.5.	Discussion	124
6.5.	Conclusion et implications pour la simulation de conduite	125

CHAPITRE 7	CONCLUSION GÉNÉRALE	127
7.1.	Synthèse des résultats.....	127
7.2.	Perspectives	128
BIBLIOGRAPHIE		131
ANNEXE A	CINÉMATIQUE INVERSE D'UNE PLATE-FORME PARALLÈLE DE TYPE GOUGH-STEWART (6 DDL).....	139
ANNEXE B	PILOTAGE DE LA PLATE-FORME MOOG.....	143
B.1.	Stratégie de commande	144
B.2.	Commande plate-forme	145
ANNEXE C	SHADER DE CORRECTION D'IMAGE	147

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 – ILLUSION VISUELLE D’EBBINGHAUS (OU TITCHENER).....	3
FIGURE 2 – « JUST NOTICEABLE DIFFERENCE » (JND) DANS LE CAS DE LA SIMULATION D’UN MOUVEMENT VERS L’AVANT, D’APRÈS (N. FILLIARD 2009).	4
FIGURE 3 –SIMULATEUR DE CONDUITE AUTOMOBILE ARTS ET MÉTIERS SAAM.....	5
FIGURE 4 – MODIFICATION DU CHAMP DE VISION GÉOMÉTRIQUE (GFOV POUR GEOMETRIC FIELD OF VIEW) PAR CHANGEMENT DU POINT DE VUE PAR RAPPORT À L’ÉCRAN, D’APRÈS (DIELS ET PARKES 2009).	6
FIGURE 5 – DESCRIPTION ANATOMIQUE SCHÉMATIQUE DE L’ŒIL : VUE SCHÉMATIQUE EN COUPE SAGITTALE.....	10
FIGURE 6 – IMAGE OPHTHALMOSCOPIQUE DE L’ŒIL, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002)	11
FIGURE 7 – ORGANISATION LAMINAIRE DE LA RÉTINE, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002).	12
FIGURE 8 – SENSIBILITÉ SPECTRALE DES 3 DIFFÉRENTS TYPES DE CÔNES, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002).....	13
FIGURE 9 – RÉPARTITION DES CÔNES ET DES BÂTONNETS SUR LA RÉTINE, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002).	14
FIGURE 10 – CELLULES GANGLIONNAIRES DE TYPE P ET M DE LA RÉTINE DU MACAQUE, D’APRÈS (WATANABE ET RODIECK 1989) . ..	14
FIGURE 11 – RÉPONSES DES CELLULES GANGLIONNAIRES DE TYPE M ET DE TYPE P, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002) .	15
FIGURE 12 – SCHÉMA DE L’OREILLE HUMAINE EN COUPE SAGITTALE, D’APRÈS (GRAF ET KLAM 2006)	16
FIGURE 13 - LE SYSTÈME VESTIBULAIRE DE L’HOMME, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002)	16
FIGURE 14 – POSITION ET ORIENTATION DES SYSTÈMES VESTIBULAIRES ET DES CANAUX SEMI-CIRCULAIRES, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002).....	17
FIGURE 15 – FONCTIONNEMENT PAR COUPLE DES CANAUX SEMI-CIRCULAIRES, D’APRÈS (KLAM 2003).....	18
FIGURE 16 – VUE EN COUPE DE LA CRÊTE AMPULLAIRE D’UN CANAL SEMI-CIRCULAIRE, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002)	19
FIGURE 17 – MOUVEMENT DE L’ENDOLYPHE ET DE LA CRÊTE AMPULLAIRE LORS D’UNE ROTATION DU CANAL SEMI-CIRCULAIRE VERS LA GAUCHE, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002)	19
FIGURE 18 – MODIFICATION DU SIGNAL TRANSMIS PAR LES CELLULES CILIÉES D’UN CANAL SEMI-CIRCULAIRE EN FONCTION DE L’INCLINAISON DES CILS, D’APRÈS (KLAM 2003).	20
FIGURE 19 – RÉPONSE DES CANAUX SEMI-CIRCULAIRES.....	21
FIGURE 20 –POSITIONS ET ORIENTATIONS DES MACULAE DE L’UTRICULE ET DU SACCULE, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002).....	22
FIGURE 21 – VUE EN COUPE SCHÉMATIQUE DE LA MACULA DE L’UTRICULE, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002).....	23
FIGURE 22 – FONCTIONNEMENT DES MACULAE DE L’UTRICULE ET DU SACCULE.....	23
FIGURE 23 – DISTINCTION ENTRE ACCÉLÉRATION HORIZONTALE ET INCLINAISON DE LA TÊTE, D’APRÈS (BEAR, CONNORS ET PARADISO 2002).....	24
FIGURE 24 - RÉPONSE DES ORGANES À OTOLITHES.	25
FIGURE 25 – HOMONCULUS.....	27
FIGURE 26 – FRÉQUENCE D’ÉMISSION DE POTENTIELS D’ACTIONS D’UN NEURONE DES NOYAUX VESTIBULAIRES SOUS PLUSIEURS STIMULATIONS, D’APRÈS (WAESPE ET HENN 1977).	29
FIGURE 27 – MÉCANISME DU RÉFLEXE VESTIBULO-OCULAIRE, D’APRÈS (ROBINSON 1977)ET REPRIS PAR (KLAM 2003).	30
FIGURE 28 – ORIENTATION TRIDIMENSIONNELLE DES PLANS DES CANAUX SEMI-CIRCULAIRES ET DES DIRECTIONS DE TRACTION DES MUSCLES EXTRA-OCULAIRES CHEZ L’HOMME, D’APRÈS (GRAF ET KLAM 2006).....	31
FIGURE 29 – EXEMPLE DE REPRÉSENTATION D’UN FLUX OPTIQUE SIMULANT UN MOUVEMENT VERS L’AVANT, D’APRÈS (KLAM 2003).	34
FIGURE 30 – STRUCTURES POSSIBLES DE FLUX RÉTINIENS, D’APRÈS (LAPPE, BREMMER ET VAN DEN BERG 1999).	35
FIGURE 31 – REPRÉSENTATION DU FLUX OPTIQUE SUR UNE RÉTINE HÉMISPHERIQUE, D’APRÈS (LONGUET-HIGGINS ET PRAZDNY 1980).	36
FIGURE 32 – INDÉTERMINATION PAR LE FLUX OPTIQUE DE LA COMPOSANTE DE MOUVEMENT EN PROFONDEUR, D’APRÈS (CLIFFORD, BEARDSLEY ET VAINA 1999).....	37
FIGURE 33 – ILLUSTRATION DE L’AMBIGUÏTÉ D’ÉCHELLE DU FLUX OPTIQUE.....	37
FIGURE 34 – ILLUSTRATION DE LA LOI PROPOSÉE PAR (BERTHOZ ET DROULEZ 1982) SUR LA PERCEPTION DE LA VITESSE À PARTIR DES DONNÉES DU FLUX OPTIQUE.....	38
FIGURE 35 – ILLUSTRATION DE LA DÉCLINAISON ANGULAIRE, D’APRÈS (KEMENY ET PANERAI 2003).	41
FIGURE 36 – ILLUSTRATION DU PHÉNOMÈNE DE PARALLAXE DE MOUVEMENT, D’APRÈS (GUERRAZ, ET AL. 2001).	42
FIGURE 37 – EXEMPLES D’APPARATUS POUR L’ÉTUDE DES VECTIONS LINÉAIRES (A ET B) ET CIRCULAIRES (C ET D), D’APRÈS (NEIMER 2002).....	45
FIGURE 38 – MODÈLE FONCTIONNEL DÉCRIVANT LA CONSTRUCTION DU SIGNAL DE RÉFÉRENCE ET DES PERCEPTS DE MOUVEMENT PROPRE ET DE MOUVEMENTS D’OBJET DANS L’ESPACE, D’APRÈS (WERTHEIM 1994).....	48

FIGURE 39 – SENSORAMA SIMULATOR (HEILIG 1962)	53
FIGURE 40 – SIMULATEURS DE CONDUITE AUTOMOBILE INTERACTIFS DES ANNÉES 1980 À 2000.....	54
FIGURE 41 – SIMULATEURS « HAUTE FIDÉLITÉ » À ARCHITECTURE MÉCANIQUE À 8 DEGRÉS DE LIBERTÉ.	56
FIGURE 42 – SIMULATEURS « HAUTE FIDÉLITÉ » À ARCHITECTURE MÉCANIQUE DÉDIÉE.....	57
FIGURE 43 – EXEMPLES DE SIMULATEURS STATIQUES.....	58
FIGURE 44 - ILLUSTRATION DE LA TECHNIQUE DE TILT COORDINATION.	62
FIGURE 45 – EXEMPLE D’UNE PLATE-FORME DE TYPE GOUGH-STEWART À 6 DEGRÉS DE LIBERTÉ, DANS SA POSITION AU REPOS SUR L’IMAGE DE DROITE.	63
FIGURE 46 – COMPARAISON DE 3 RÉGLAGES DE STRATÉGIE DE COMMANDE DIFFÉRENTS.....	65
FIGURE 47 – SCANER® STUDIO (SOURCE WWW.SCANERSIMULATION.COM).....	69
FIGURE 48 – OPENSIMULATION, D’APRÈS (FILLIARD, ET AL. 2010).....	70
FIGURE 49 – STRUCTURE DE LA STRATÉGIE DE COMMANDE CLASSIQUE POUR LE CAS DES ACCÉLÉRATIONS LONGITUDINALE ET DE TANGAGE. CETTE STRUCTURE EST GÉNÉRALISABLE AUX AUTRES AXES.	71
FIGURE 50 – STRUCTURE DE LA STRATÉGIE DE COMMANDE OPTIMALE.....	72
FIGURE 51 – STRATÉGIE ADAPTATIVE, D’APRÈS (DAGDELEN 2005).	74
FIGURE 52 - MODÈLE DU STÉNOPÉ (SOURCE : WIKIMEDIA COMMONS).....	75
FIGURE 53 – ILLUSTRATION DU CONCEPT DE CAMÉRA ASYMÉTRIQUE EN RÉALITÉ VIRTUELLE.....	75
FIGURE 54 – PIPELINE GRAPHIQUE DU PROCESSEUR DE TRAITEMENT GRAPHIQUE (GRAPHICS PROCESSING UNIT GPU) DE LA CARTE GRAPHIQUE (SOURCE : WIKIMEDIA COMMONS).....	76
FIGURE 55 – TECHNIQUE DE BUMP MAPPING UTILISANT DES SHADERS (SOURCE : WIKIMEDIA COMMONS).	77
FIGURE 56 – TECHNIQUE DE CELL-SHADING OU TOON-SHADING (SOURCE : WIKIMEDIA COMMONS).	77
FIGURE 57 – MODIFICATION DU CHAMP DE VISION GÉOMÉTRIQUE (GFOV) EN DÉPLAÇANT LE POINT DE VUE VIRTUEL DE L’OBSERVATEUR, SELON (DIELS ET PARKES 2009)	82
FIGURE 58 – DÉFINITION DU FACTEUR D’ÉCHELLE VISUELLE F_{EV}	82
FIGURE 59 - INFLUENCE DU CHAMP DE VISION GÉOMÉTRIQUE SUR LA VITESSE PRODUITE.....	83
FIGURE 60 – CHANGEMENT INDUIT PAR LE CHANGEMENT DE POINT DE VUE VIRTUEL SUR UN VECTEUR VITESSE.	84
FIGURE 61 – FLUX OPTIQUES CORRESPONDANT AU MÊME CHAMP DE VITESSES, OBTENUS AVEC DES FACTEURS D’ÉCHELLE VISUELLE (F_{EV}) DIFFÉRENTS.	85
FIGURE 62 - FLUX OPTIQUES CORRESPONDANT AU MÊME CHAMP DE VITESSES, OBTENUS AVEC DES FACTEURS D’ÉCHELLE VISUELLE (F_{EV}) DIFFÉRENTS.....	86
FIGURE 63 – CONCEPT DU SIMULATEUR DE CONDUITE SAAM (SIMULATEUR DE CONDUITE AUTOMOBILE ARTS ET MÉTIERS).	87
FIGURE 64 – SYSTÈME À RETOUR D’EFFORT PASSIF POUR LA PÉDALE DE FREIN DU SIMULATEUR SAAM.....	89
FIGURE 65 – ILLUSTRATION DES TECHNIQUES DE WARPING ET DE BLENDING SUR SAAM.	90
FIGURE 66 – PLATE-FORME ÉLECTROMÉCANIQUE MOOG 6 DOF 2000E À 6 DEGRÉS DE LIBERTÉS (6 DDL).	91
FIGURE 67 – CAPACITÉS DE LA PLATE-FORME MOOG 6 DOF 2000E SELON CHAQUE DEGRÉ DE LIBERTÉ, EN TERMES DE POSITIONS, VITESSES ET ACCÉLÉRATIONS MAXIMALES ATTEIGNABLES.	92
FIGURE 68 – TRONÇON DE ROUTE DE CAMPAGNE RECTILIGNE D’ENVIRON 2 KM UTILISÉ POUR L’ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.	93
FIGURE 69 – CAPTURES D’ÉCRAN PRISES AVEC DES FACTEURS D’ÉCHELLE VISUELLE DIFFÉRENTS.	95
FIGURE 70 – VITESSE ATTEINTE (A) ET VITESSE ATTEINTE MOYENNE (B) EN FONCTION DU FACTEUR D’ÉCHELLE VISUELLE POUR LES 2 CONSIGNES DE VITESSE : 50 KM/H EN CERCLES BLEUS ET 90 KM/H EN TRIANGLES ROUGES.....	96
FIGURE 71 – ERREUR (A) ET ERREUR MOYENNE (B) DE LA VITESSE ATTEINTE PAR RAPPORT À LA VITESSE CONSIGNÉ (EN %) EN FONCTION DU FACTEUR D’ÉCHELLE VISUELLE.....	97
FIGURE 72 – ERREUR (A) ET ERREUR MOYENNE (B) DE LA VITESSE ATTEINTE PAR RAPPORT À LA VITESSE ATTEINTE AVEC UN F_{EV} DE 1.0 (EN %), EN FONCTION DU FACTEUR D’ÉCHELLE VISUELLE.	98
FIGURE 73 – IMPACT DU FACTEUR D’ÉCHELLE VISUELLE EN FONCTION DE LA VITESSE : LA PROGRESSION EST TRÈS LINÉAIRE AVEC UN COEFFICIENT DE RÉGRESSION LINÉAIRE $R^2 = 0.9999$	99
FIGURE 74 – REPRISE DE LA FIGURE 71.A ET DE LA FIGURE 72.A EN DISTINGUANT LES VALEURS EN FONCTION DE LA VITESSE CONSIGNÉ.	100
FIGURE 75 – EXEMPLES DE FONCTIONS PSYCHOMÉTRIQUES REPRÉSENTÉES PAR DES NORMALES CUMULATIVES.....	106
FIGURE 76 – EXEMPLE DE COURBE PSYCHOMÉTRIQUE OBTENUE EXPÉRIMENTALEMENT AVEC LA MÉTHODE DES STIMULI CONSTANTS, D’APRÈS (EHRENSTEIN ET EHRENSTEIN 1999).	107
FIGURE 77 – EXEMPLE DE STAIRCASE DESCENDANT.	108
FIGURE 78 – EXEMPLE DE MESURE DE SEUIL AVEC 2 STAIRCASES (UN ASCENDANT ET UN DESCENDANT) ENTRELAÇÉS DE FAÇON ALTERNÉE, AVEC UN PAS VARIABLE.....	109
FIGURE 79 – GÉOMÉTRIE DU PROBLÈME DE DÉFORMATION DE L’IMAGE EN FONCTION DU POINT DE VUE.	110
FIGURE 80 – DÉROULEMENT DU TEST À CHOIX FORCÉ.	115
FIGURE 81 – ILLUSTRATIONS DE L’ENVIRONNEMENT VIRTUEL UTILISÉ POUR L’EXPÉRIMENTATION.....	116

FIGURE 82 – TEXTURES UTILISÉES POUR MODÉLISER L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL.....	116
FIGURE 83 – VUE PANORAMIQUE À 150° DE L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL, DU POINT DE VUE DU CONDUCTEUR.....	117
FIGURE 84 – ILLUSTRATION DU DÉFILEMENT D'UNE TEXTURE.....	117
FIGURE 85 – DIMENSIONS NORMALISÉES FRANÇAISES D'ÉLÉMENTS ROUTIERS.....	118
FIGURE 86 – PHOTOGRAPHIE D'UNE ROUTE DE RASE CAMPAGNE RÉELLE AVEC DES DÉLINÉATEURS (SOURCE : WIKIMEDIA COMMONS) POUR COMPARAISON AVEC LA FIGURE 81 ET LA FIGURE 83.....	119
FIGURE 87 – RÉSULTATS OBTENUS AU COURS DES TESTS PRÉLIMINAIRES.....	120
FIGURE 88 – PROTOCOLE FINAL UTILISÉ POUR L'EXPÉRIMENTATION.....	121
FIGURE 89 – ILLUSTRATION DE LA DIFFÉRENCE ENTRE LE PROTOCOLE INITIAL ET LE PROTOCOLE FINAL AU NIVEAU DE LA VARIATION DU FACTEUR D'ÉCHELLE VISUELLE AU COURS DU TEMPS.....	122
FIGURE 90 – RÉSULTATS DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	123
FIGURE 91 – MOYENNES DES SEUILS DE PERCEPTION MESURÉS, EN FONCTION DE CHAQUE CONDITION.....	124

Chapitre 1 Introduction

1.1. Pourquoi simuler la conduite ?

L'automobile est aujourd'hui le type de transport personnel le plus utilisé et occupe à ce titre une place centrale dans l'organisation de nos sociétés. Quelques chiffres permettent de se rendre compte de cette prédominance du transport automobile. Par exemple selon l'Enquête Globale de Transport (EGT 2001-2002), la voiture est devenue depuis 1983 le moyen de transport prédominant (devant la marche à pied !) en Ile-de-France. Concernant le nombre de voitures en Europe : il est passé de moins de 125 millions en 1980 à plus de 250 millions en 2004 (Source : Geo Data Portal à partir des données UNSD 2007), et pour la seule année 2009, plus de 61 millions de véhicules (voitures et véhicules utilitaires) ont été mis sur le marché dans le monde.

Cette forte croissance du trafic routier a bien entendu été accompagnée d'une évolution des contraintes et des attentes concernant les voitures. D'une part, les industries automobiles ont dû réduire leurs coûts pour rendre l'automobile accessible au plus grand nombre. D'autre part, les exigences en termes de sécurité et de fiabilité afin de faire face à la densification et à la complexification du trafic routier se sont renforcées. Depuis peu, des contraintes économiques, mais aussi écologiques, quant à la consommation en carburant et à la pollution engendrée ont aussi vu le jour. Toutes ces contraintes ont incité les différents acteurs concernés à mener de nouvelles campagnes de recherche et de développement, afin de faire évoluer les automobiles mais également les conducteurs.

Pour les constructeurs automobiles, les objectifs sont de réduire les délais et les coûts de conception et de fabrication de leurs véhicules, mais également de proposer aux conducteurs des véhicules plus fiables, plus confortables et répondant mieux à leurs attentes. Quant aux institutions en charge de la sécurité routière, l'enjeu est pour elles de mieux comprendre les situations accidentogènes afin de réduire le nombre de victimes d'accident de la route, que ce soit en formant les conducteurs, en donnant des préconisations aux constructeurs automobiles, ou en faisant évoluer la législation.

Ces recherches ont comme facteur commun l'étude du comportement du conducteur et de ses interactions avec son véhicule en situation de conduite. Afin de pouvoir multiplier ces recherches tout en réduisant leur coût, l'acquisition et l'utilisation de simulateurs de conduite¹ par les différents acteurs a alors connu une grosse expansion. Cet essor a également été renforcé par la puissance de calcul toujours croissante proposée par les ordinateurs actuels, qui permet de réaliser des simulateurs performants à un coût raisonnable.

¹ Le terme « simulateur de conduite » est ambigu : il peut à la fois désigner le logiciel de simulation de conduite et le système physique permettant de conduire un véhicule automobile virtuel dans un environnement de conduite (lui aussi virtuel). Par la suite, c'est cette deuxième définition qui sera sous-entendue lorsqu'il sera fait mention de « simulateur de conduite ».

Les simulateurs de conduite permettent d'immerger le conducteur dans une représentation virtuelle multi-sensorielle d'un environnement de conduite. Même s'il n'existe pas de norme sur les différents éléments composant un simulateur, on retrouve néanmoins certaines similarités. Un cockpit reproduisant l'intérieur d'un véhicule permet au conducteur de conduire le véhicule simulé de la même manière qu'un véhicule réel. Le cockpit est généralement doté de systèmes de restitution sonore et de systèmes à retour d'effort, notamment sur le volant, les pédales et la boîte de vitesses. Certains simulateurs dits *dynamiques* sont également munis d'une architecture mécanique permettant de déplacer le cockpit et le conducteur dans la salle de simulation afin de restituer tout ou partie des accélérations du véhicule simulé. Enfin, un écran (cylindrique, sphérique, à facette, LCD, monoscopique ou stéréoscopique...) ou un casque de réalité virtuelle affiche en temps interactif l'image de synthèse correspondant à l'environnement de conduite virtuel.

L'utilisation de simulateurs de conduite présente plusieurs intérêts. D'une part, contrairement à un véhicule réel, la vie (ou tout du moins l'intégrité) du conducteur n'est pas mise en danger. On peut ainsi étudier son comportement dans des situations accidentogènes, chose qui ne serait pas possible car trop dangereuse en conditions réelles. D'autre part, les simulateurs de conduite permettent également d'avoir une bonne reproductibilité : tous les sujets sont placés dans les mêmes conditions expérimentales. Ils permettent de surcroît la réduction des temps de test et ainsi l'accroissement du nombre de conditions testées.

On voit donc que les simulateurs de conduite sont un outil permettant aussi bien aux constructeurs automobiles qu'aux institutions en charge de la sécurité routière d'atteindre leurs objectifs de recherche. Toutefois ceci suppose que la « sensation » de mouvement procurée par le simulateur soit suffisamment proche de celle procurée par un véhicule réel afin d'observer un comportement du conducteur le plus proche possible de celui en conditions réelles. Le degré de réalisme que procure le simulateur de conduite utilisé est alors crucial pour la validité des études qui y sont menées. Améliorer ce degré de réalisme requiert à la fois des compétences en sciences humaines, en neurosciences, en informatique et en automatique afin d'une part de comprendre les mécanismes humains régissant la perception de mouvement et d'autre part d'utiliser au mieux les capacités de restitution des simulateurs. La combinaison de ces différents champs d'investigation est nécessaire pour répondre au mieux à la problématique de la validité perceptive des simulateurs de conduite, problématique générale dans laquelle s'inscrit cette thèse.

1.2. Percevoir et restituer le mouvement

Conduire une voiture est une action que nous faisons de façon régulière. Et il est fascinant de voir les nombreux mécanismes et réflexes appris et utilisés afin de pouvoir contrôler son véhicule. L'être humain est en effet doté de plusieurs organes comme les yeux, les oreilles, le système vestibulaire ou les récepteurs articulaires entre autres, lui permettant d'apprécier son déplacement dans son environnement. Les travaux de Gibson ((Gibson et Crooks 1938), (Gibson 1950), (Gibson 1954), (Gibson 1968)) tendent à montrer que la perception du mouvement est basée principalement sur la vision et le flux optique, et donc que la conduite est une tâche à prédominance visuelle. Plus tard, les travaux sur simulateur d'avion de (Parrish et Martin 1976), et sur simulateur de conduite de (G. Reymond, A. Kemeny, et al. 2001) ou encore de (I. Siegler, et al. 2001) ont montré la nécessité des

restitutions inertielles pour la fidélité du comportement du conducteur. Or ce comportement est précisément l'objet principal des études menées sur simulateur. On comprend donc la nécessité d'utiliser plusieurs modalités sensorielles pour restituer le mouvement du véhicule simulé.

On prend toutefois rapidement conscience de l'impossibilité de restituer pleinement selon toutes les modalités sensorielles évoquées précédemment le mouvement complet du véhicule simulé, et plus particulièrement au niveau de la modalité vestibulaire. En effet, comment envisager un seul instant qu'il soit possible de simuler la conduite s'il fallait déplacer le simulateur sur plusieurs kilomètres à l'image du véhicule simulé ? Fort heureusement, ce n'est pas nécessaire. Les recherches effectuées en psychophysique² depuis la fin du XIX^{ème} siècle ont montré qu'il pouvait exister de grandes disparités entre le stimulus et le *percept*. De nombreuses illusions sensorielles dont nous sommes régulièrement les témoins en attestent. Qui, attendant le départ de son train, ne s'est jamais senti partir alors qu'en réalité c'était le train d'à côté qui partait ? Qui n'a jamais eu l'impression que le métro s'inclinait vers l'arrière lors de son accélération de départ alors qu'il restait parfaitement horizontal ? L'illusion d'Ebbinghaus (ou Titchener) en Figure 1 est un autre exemple d'illusion sensorielle cette fois purement visuelle.

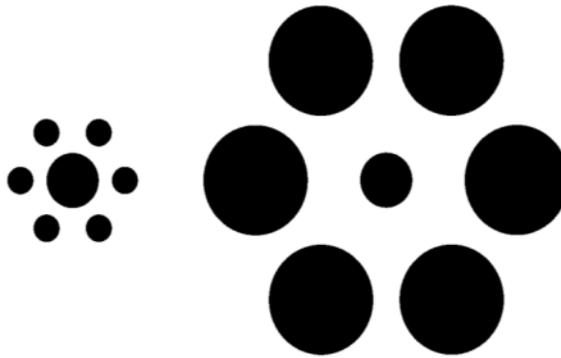


Figure 1 – Illusion visuelle d'Ebbinghaus (ou Titchener).

Les disques centraux, pourtant de taille identique sont perçus par les sujets comme étant de tailles différentes : celui de droite (entouré par les grands disques) plus petit que celui de gauche (entouré par les petits disques).

Les organes humains ont une précision limitée et les informations qu'ils renvoient sont ensuite interprétées par le cerveau afin de faire émerger une sensation de mouvement cohérente. C'est avant tout cette sensation de mouvement que l'on cherche à reproduire en simulation de conduite, en utilisant la différence qu'il existe entre le mouvement réel et le mouvement perçu. Filliard par exemple (N. Filliard 2009), en étudiant les interactions visuo-vestibulaires, a montré qu'il existait des zones d'équivalence perceptive. Par rapport à une condition de référence, il existe un ensemble de conditions pour lesquelles la sensation de mouvement créée est non discernable de celle créée avec la condition de référence (Figure 2).

² Bien avant les premiers simulateurs, au XIX^{ème} siècle, Gustav Theodor Fechner (1801-1887) a posé les fondements d'une nouvelle discipline, la psychophysique, cherchant à déterminer les relations quantitatives entre un stimulus physique et la perception qu'on en a. Avant lui, d'autres philosophes comme Kant, Descartes ou même Platon s'étaient déjà interrogés sur le fait que nous ne connaissons pas vraiment la réalité, mais seulement la réalité telle qu'elle nous apparaît et telle que nous l'interprétons.

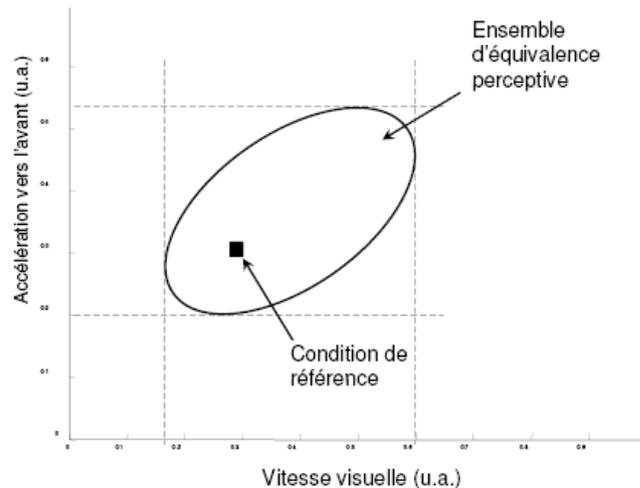


Figure 2 – « Just noticeable difference » (JND) dans le cas de la simulation d'un mouvement vers l'avant, d'après (N. Filliard 2009).

A un instant précis, l'observateur voit l'environnement virtuel défiler vers lui à une certaine vitesse et est soumis à un certain niveau d'accélération (condition de référence, figurée par un carré noir). Au voisinage de cette condition, il existe tout un ensemble de couples d'amplitudes de vitesse visuelle et d'accélération qui créeront une sensation de déplacement propre que le sujet sera incapable de discerner de la condition de référence : il s'agit donc d'une zone d'équivalence perceptive.

Pratiquement, un tel résultat va pouvoir être utilisé pour optimiser le contrôle des simulateurs de conduite. En effet, d'une part ce résultat montre qu'il n'est pas nécessaire de reproduire parfaitement les conditions réelles de conduite. D'autre part, en continuant les expérimentations sur un plus grand nombre de conditions de références, il serait alors possible de déterminer les lois qui conditionnent la forme et la taille de la zone d'équivalence perceptive pour n'importe quelle condition de départ. Ce résultat serait directement applicable pour la loi de commande du simulateur. On voit donc l'importance de connaître les mécanismes de la perception humaine du mouvement pour l'application à la simulation de conduite.

1.3. Contexte de l'étude

Dans le cadre du projet CoSiC (étude du Comportement en Situation de Conduite) en partenariat avec le Centre Technique de Simulation (CTS) situé au Technocentre de Renault (Guyancourt, France), l'Institut Image d'Arts et Métiers ParisTech a développé un simulateur de conduite dédié à l'étude du comportement du conducteur. Baptisé SAAM pour Simulateur de conduite Automobile Arts et Métiers (Figure 3), il s'agit d'un simulateur de conduite dynamique monté sur une plate-forme électro-mécanique à 6 degrés de liberté de type Gough-Stewart (robot parallèle à 6 vérins).

Le CTS possède une forte expérience dans le domaine de la conception et de la réalisation de simulateurs de conduite. Il exploite en effet 5 simulateurs de conduite, dont 2 simulateurs dynamiques, utilisés comme moyens d'essais virtuels dans différents domaines de l'Ingénierie Véhicule : ergonomie, conception des éclairages, prestations dynamiques, systèmes d'aide à la conduite, étude du comportement conducteur, etc. Leur expérience nous a aidés à mener à bien la conception, la réalisation et les réglages de SAAM. C'est dans ce projet que cette thèse s'est inscrite.

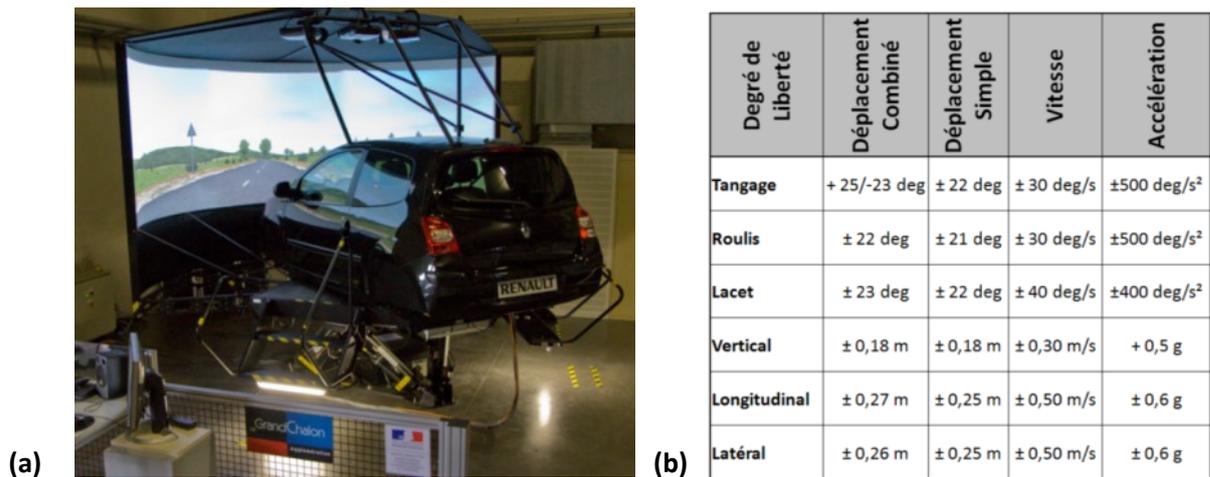


Figure 3 – Simulateur de conduite Automobile Arts et Métiers SAAM.

- (a) Photo montrant la composition du simulateur : un cockpit basé sur une Renault Twingo 2, un écran cylindrique (150° de champ de vision latéral) solidaire du cockpit et monté sur une plate-forme électromécanique à 6 degrés de liberté (robot parallèle de type Gough-Stewart).
- (b) Données constructeur des capacités physiques de la plate-forme électro-mécanique.

1.4. Problématique et Plan de lecture

1.4.1. Problématique

Percevoir sa vitesse est une tâche importante que le conducteur doit réaliser constamment pendant la conduite pour contrôler son véhicule. Il apparaît que plusieurs facteurs ont une influence sur la perception de la vitesse (Kemeny et Panerai 2003) : la hauteur du point de vue, le champ de vision, le réalisme de l'environnement, mais aussi le réalisme des restitutions proprioceptives, notamment au volant. Si certains simulateurs sont suffisamment performants pour restituer le mouvement de façon satisfaisante selon tous ces critères, ce n'est pas forcément le cas de tous. Pour des raisons souvent financières, certains simulateurs peuvent avoir par exemple un champ de vision réduit ou une base de données visuelles pauvre en détails. Il en résulte alors une perception de la vitesse souvent sous-estimée, qui se traduit par une vitesse de conduite plus élevée que celle en conduite réelle. La validité perceptive du simulateur de conduite n'est alors plus suffisante pour certaines études de comportement du conducteur, comme par exemple des études sur les régulateurs de vitesse.

Pour tenter de résoudre ce problème, (Diels et Parkes 2009) proposent de modifier le champ de vision géométrique (GFOV pour *Geometrical Field Of View*) tout en gardant un champ de vision constant (Figure 4). Leurs premiers résultats montrent que la vitesse perçue augmente avec l'accroissement du GFOV. Ce procédé simple permet donc, sans modification coûteuse du simulateur, de changer la vitesse perçue par le conducteur. C'est cette technique qui sera étudiée de façon plus approfondie au cours de notre étude.

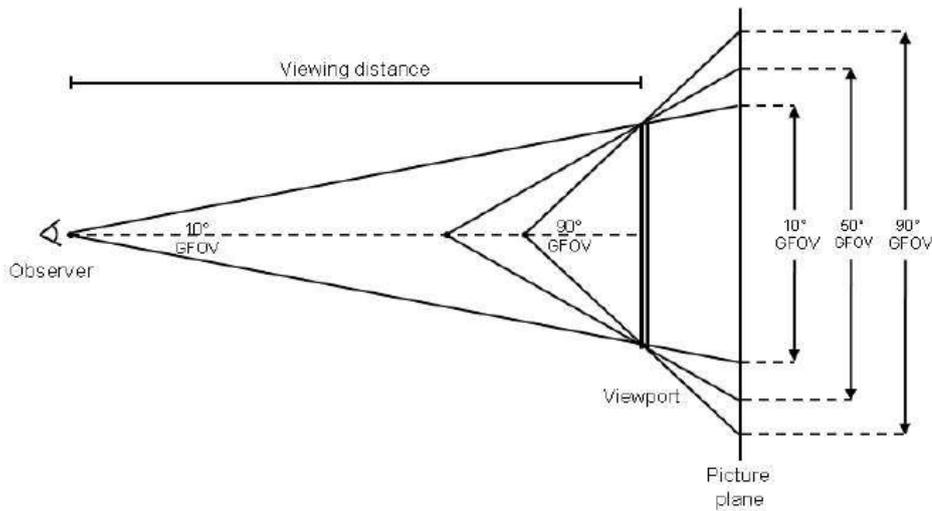


Figure 4 – Modification du champ de vision géométrique (GFOV pour Geometric Field Of View) par changement du point de vue par rapport à l'écran, d'après (Diels et Parkes 2009).

Le GFOV diminue lorsque le point de vue de l'observateur pour lequel l'image est calculée est reculé.

Nous aborderons dans cette thèse ce thème général de la validité perceptive du simulateur de conduite, et plus particulièrement la perception de vitesse. Nous tenterons notamment de répondre aux questions suivantes :

- Comment la modification du champ de vision géométrique (GFOV) impacte-t-elle la perception de vitesse du conducteur ?
- Est-il possible d'adapter le champ de vision géométrique en temps réel par rapport à la situation de conduite ?

1.4.2. Plan de lecture

L'état de l'art proposé dans cette thèse s'articulera en 3 chapitres. Le Chapitre 2 traitera des différentes modalités sensorielles utilisées par l'homme pour la perception du mouvement. Une description des principaux organes entrant en jeu permettra de comprendre leur fonctionnement et nous verrons qu'ils réalisent un premier traitement pour la perception du mouvement.

Le Chapitre 3 présentera les différents processus partant du signal acheminé par les organes présentés au chapitre précédent, et aboutissant au mouvement perçu. Nous verrons comment le cerveau fusionne toutes les données provenant de modalités sensorielles différentes pour en faire une sensation de mouvement unique et cohérente.

Enfin, le Chapitre 4 expliquera comment le mouvement est restitué en simulation de conduite. Un rapide historique des simulateurs permettra d'apprécier les architectures mécaniques et informatiques mises en place de nos jours. Les principales solutions employées pour la restitution de chaque modalité sensorielle y seront présentées.

Le Chapitre 5 présentera la première étude expérimentale, ainsi que le simulateur de conduite dynamique SAAM, conçu et développé durant cette thèse, et avec lequel cette expérimentation a été menée. Nous avons étudié l'impact du champ de vision géométrique (GFOV) sur la perception de vitesse, dans le cadre d'une tâche de reproduction de vitesse. Cette étude confirme les résultats de (Diels et Parkes 2009) quant à l'augmentation de la vitesse perçue avec l'accroissement du GFOV.

Le Chapitre 6 présentera la deuxième étude expérimentale menée également sur SAAM. Cette étude vise à déterminer dans quelle mesure il est possible d'adapter le champ de vision géométrique en temps réel par rapport à la situation de conduite. Nous souhaitons que le changement de GFOV ne soit pas perçu par le conducteur. Ainsi, nous tenterons de déterminer quelle vitesse maximale de variation du GFOV permet de vérifier cette condition. Une partie de ce chapitre est également dédiée à la mise en place d'une solution technique pour la correction d'image en temps réel permettant l'affichage sur écran cylindrique.

Enfin, le Chapitre 7 conclura ce mémoire par une discussion générale autour des résultats et des perspectives de recherche amenés par cette thèse.

Chapitre 2 Voies sensorielles pour la perception du mouvement

2.1. Introduction

Ce chapitre traitera des voies sensorielles utilisées par le corps humain dans la perception du mouvement. Nous avons choisi d'y consacrer ce premier chapitre de revue bibliographique car comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, comprendre le fonctionnement des organes ainsi que des mécanismes sous-jacents liés à la perception du mouvement sera primordial pour pouvoir par la suite mieux comprendre la perception du mouvement elle-même et ainsi pouvoir restituer une sensation de mouvement cohérente sur simulateur de conduite.

La perception du mouvement ne dépend pas que d'un seul organe. Elle est le résultat de plusieurs modalités sensorielles, interprétées et fusionnées par le cerveau pour donner une sensation de mouvement cohérente (Kemeny et Panerai 2003). Les modalités visuelles et vestibulaires sont les deux modalités prépondérantes. C'est pourquoi elles seront plus particulièrement détaillées dans ce chapitre. Les modalités tactiles et proprioceptives, que l'on peut regrouper sous le terme de modalités somatosensorielles ou somesthésie, sont très sollicitées et nécessaires pour la conduite d'un véhicule mais sont de moins grande importance, relativement aux deux premières modalités, en ce qui concerne la perception même du mouvement.

Nous débuterons ce chapitre par la description anatomique de l'œil et de la rétine, puis nous continuerons avec la description du système vestibulaire. Nous détaillerons enfin la voie somatosensorielle, avant de finir avec les interactions multi-sensorielles.

2.2. Modalité visuelle

La vision est le sens prédominant chez l'homme : environ la moitié du cortex cérébral humain est consacrée à l'analyse du monde visuel (Bear, Connors et Paradiso 2002). C'est grâce à la maîtrise de ce sens que l'homme a pu développer des mécanismes mentaux pour prévoir la trajectoire des objets, le déroulement des faits dans l'espace et le temps, et développer également de nouveaux moyens de communication, le monde de l'Art... Tout ceci grâce à l'œil, organe remarquable capable de détecter des choses allant de la taille d'un insecte à celle d'une galaxie à l'autre bout de l'univers. Cette partie s'attache à décrire de façon plus approfondie le fonctionnement de l'œil.

2.2.1. Description générale de l'œil

Lorsqu'on regarde l'œil d'une personne, on ne discerne pas tous les éléments le constituant. Voici ce qu'on peut apercevoir (Figure 5). Au centre de l'œil se trouve la pupille, orifice permettant à la lumière de pénétrer à l'intérieur de l'œil. L'iris, muscle circulaire dont la pigmentation donne la couleur de l'œil, a pour rôle de contrôler l'ouverture de la pupille. La pupille et l'iris sont recouverts par un liquide : l'humeur aqueuse, elle-même contenue par la cornée. Première interface de l'œil avec le monde extérieur, la cornée ne contient aucun vaisseau sanguin afin de ne pas avoir d'influence sur l'image du monde extérieur. Et afin de préserver la netteté de sa surface, elle est recouverte d'une fine couche de larmes étalée régulièrement par les paupières. Enfin, la cornée est en continuité avec la sclérotique, communément appelée blanc de l'œil. La sclérotique constitue l'enveloppe extérieure de l'œil, sur laquelle sont fixés les 3 muscles oculaires permettant de faire tourner l'œil dans son orbite.

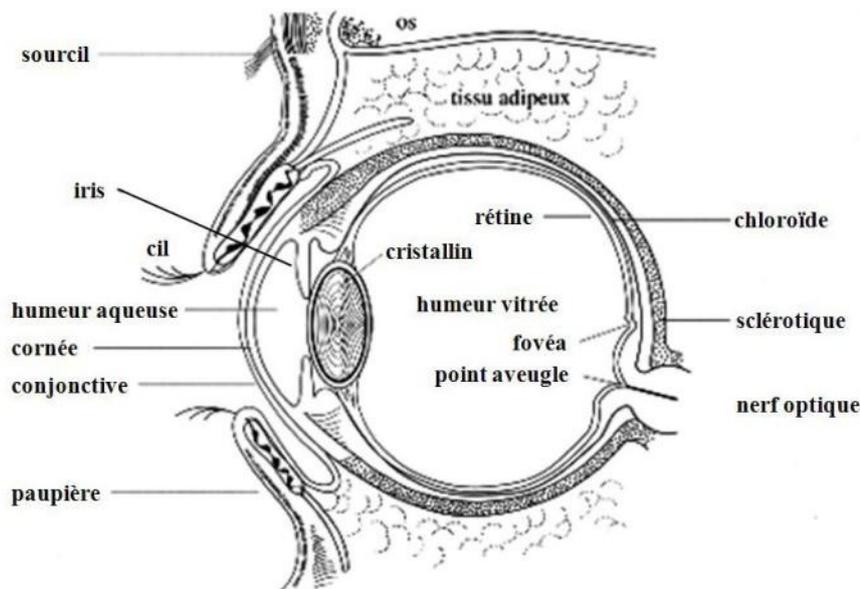


Figure 5 – Description anatomique schématique de l'œil : vue schématique en coupe sagittale.

Toutefois, bien d'autres éléments constituent l'œil, permettant ainsi de percevoir le monde extérieur. Lorsque la lumière, après être passée à travers la pupille, entre dans l'œil, elle arrive sur la surface interne de l'œil : la rétine. C'est dans la couche la plus profonde de la rétine que se trouvent les photorécepteurs qui transformeront l'intensité lumineuse en

influx nerveux. Si on compare l'œil à un appareil photographique, la rétine joue le rôle de la pellicule pour un appareil argentique, ou du capteur CCD pour un appareil numérique. Les informations renvoyées par les photorécepteurs de la rétine sont alors acheminées jusqu'au nerf optique, qui sort à l'arrière de l'œil et achemine le signal nerveux jusqu'au cerveau. Afin que l'œil garde sa forme sphérique, l'œil est rempli d'un liquide visqueux : l'humeur vitrée.

Si on compare à nouveau l'œil à un appareil photographique, on se rend compte que l'œil a besoin de l'équivalent d'un objectif pour avoir une image nette quelle que soit la distance de l'objet sur lequel porte le regard. C'est le rôle du cristallin. Surface transparente assimilable à une lentille située derrière l'iris, le cristallin est suspendu entre des ligaments attachés eux-mêmes aux muscles ciliaires. La contraction ou le relâchement de ces muscles va étirer ou bomber le cristallin, ce qui entraînera le changement de sa convergence. Ainsi, l'image du monde extérieur sera nette sur la rétine. Ce mécanisme s'appelle l'accommodation et permet, en plus d'avoir une image nette, d'avoir une information sur la distance à laquelle se trouve l'objet regardé.

2.2.2. Description de la rétine

Un examen ophtalmoscopique de l'œil (Figure 6) permet de mettre en évidence certaines particularités de la rétine et de la surface interne de l'œil. Premièrement, de nombreux vaisseaux sanguins irriguent la surface interne de l'œil. Ces vaisseaux sanguins, lorsqu'ils sont suffisamment gros, empêchent la lumière d'arriver jusqu'aux cellules photoréceptrices de la rétine. Ces vaisseaux sanguins naissent d'un disque appelé disque optique (ou tache aveugle). Cette zone particulière ne contient aucun photorécepteur et est également l'endroit par où les fibres du nerf optique sortent de la rétine et de l'œil. Il existe donc pour chaque œil une zone aveugle que le cerveau doit compenser.

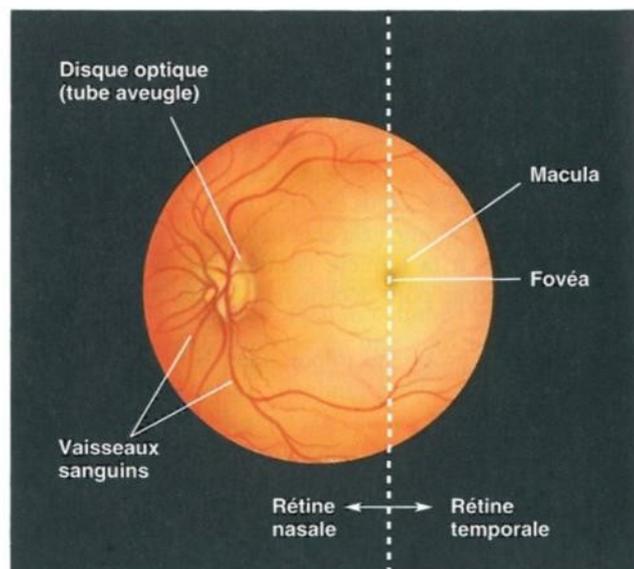


Figure 6 – Image ophtalmoscopique de l'œil, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002)

L'examen ophtalmoscopique met également en évidence une autre particularité : la macula, tache sombre en plein centre de la rétine. Aucun vaisseau sanguin de grosse taille ne passe dans cette zone. On se rend compte que la vision centrale de l'œil est de ce fait de meilleur « qualité » que la vision périphérique. La fovéa, tache noire d'environ 2 mm de

diamètre où la rétine est plus fine, se trouve au centre de la macula. Géométriquement, c'est également la zone diamétralement opposée à la pupille. C'est donc dans la fovéa que se forment les images correspondant à la vision centrale.

La rétine possède une organisation laminaire en 3 couches principales (Figure 7). Au plus profond de la rétine (c'est-à-dire au plus loin par rapport à l'humeur vitrée) se trouve la couche nucléaire externe. C'est dans cette couche que se trouvent les photorécepteurs. Il apparaît donc que la lumière doit traverser les deux autres couches : dans l'ordre la couche ganglionnaire et la couche nucléaire interne, avant d'atteindre les photorécepteurs. Ces deux dernières couches ne contiennent pas de cellules sensibles directement à la lumière.

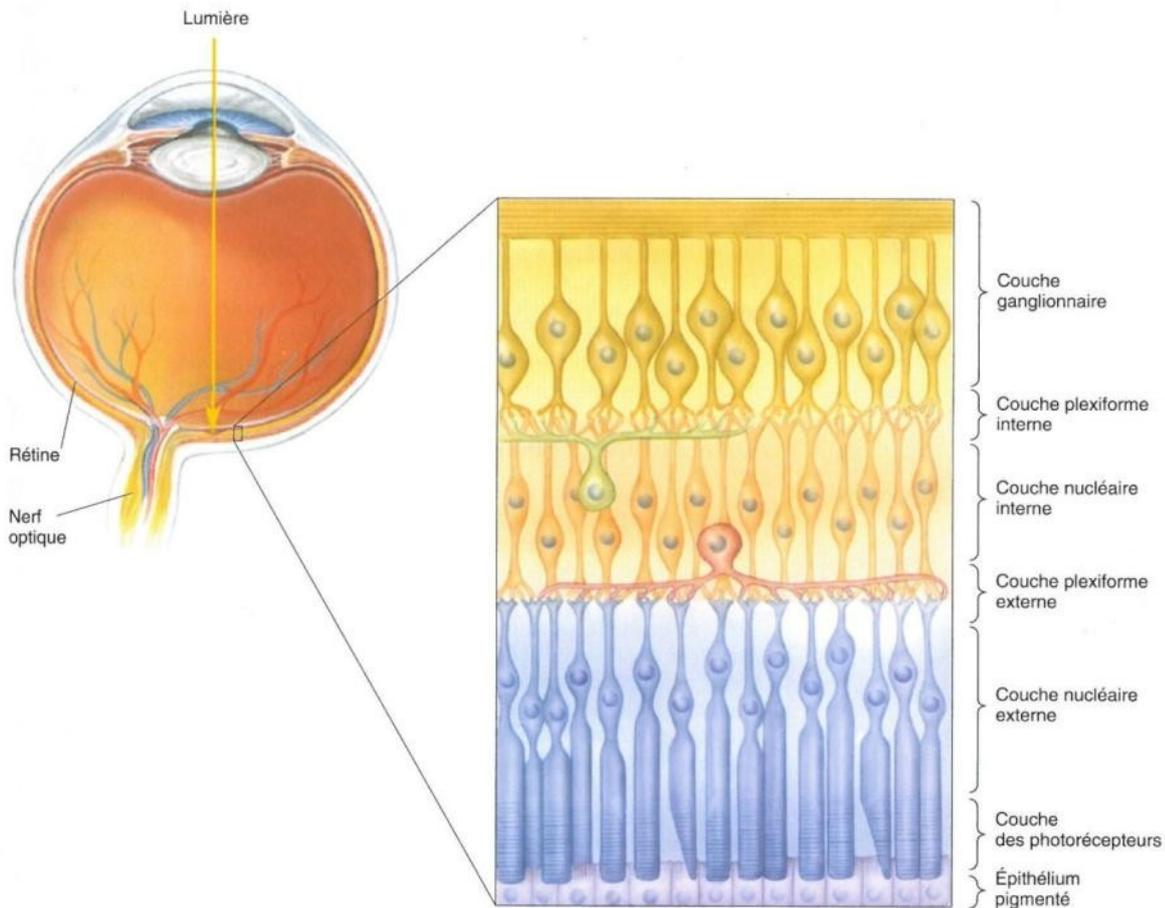


Figure 7 – Organisation laminaire de la rétine, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002).

La couche nucléaire externe, qui contient les photorécepteurs, est au plus profond de la rétine. La lumière doit donc d'abord traverser la couche ganglionnaire et la couche nucléaire interne.

Dans la voie la plus directe, l'information visuelle est transmise des photorécepteurs aux cellules bipolaires de la couche nucléaire interne, qui la transmettent à leur tour aux cellules de la couche ganglionnaire. Les axones des cellules ganglionnaires forment ensuite le nerf optique. Les cellules ganglionnaires sont les seules à transmettre des informations au cerveau, par le principe des potentiels d'action³. Il existe aussi des voies transversales via des cellules horizontales (dans la couche plexiforme externe) et des cellules amacrines (dans la couche plexiforme interne). Ces deux types de cellules permettent de diffuser des

³ Au repos, les cellules ganglionnaires émettent par leur axone des potentiels d'action à une fréquence de base. On parle de décharge tonique. Lorsqu'elles sont excitées, la fréquence d'émission de leurs potentiels d'action augmente. Au contraire lorsqu'elles sont inhibées, la fréquence d'émission de leurs potentiels d'action diminue.

informations entre les neurones bipolaires pour les cellules horizontales, et entre les cellules ganglionnaires pour les cellules amacrines. De ce fait, les cellules ganglionnaires sont en moins grand nombre que les cellules bipolaires, elles-mêmes en moins grand nombre que les photorécepteurs.

Les photorécepteurs ne sont pas tous du même type. Il en existe deux sortes : les bâtonnets et les cônes, les premiers étant 20 fois plus nombreux que les deuxièmes chez l'homme. Les bâtonnets sont également plus sensibles à la lumière (environ 1000 fois plus) : ce sont donc principalement eux qui sont actifs lors de faibles luminosités, comme la nuit ou dans une pièce sombre par exemple. Les cônes sont plus actifs en cas de fortes luminosités. Mais ce n'est pas la seule différence : alors que les bâtonnets possèdent tous le même photopigment, on peut classer les cônes en 3 sous-catégories en fonction de la longueur d'onde à laquelle ils sont sensibles. En fait, seuls les cônes permettent la vision en couleur. La Figure 8 présente les sensibilités spectrales des 3 différents types de cônes : « bleu », « vert » et « rouge ». Les cônes « bleu » réagissent de façon optimale pour une longueur d'onde se situant vers 430 nm, les cônes « vert » vers 530 nm et les cônes « rouge » vers 560 nm.

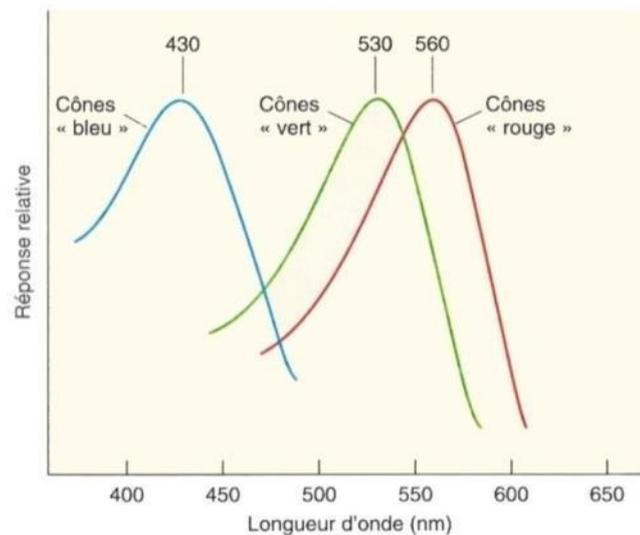


Figure 8 – Sensibilité spectrale des 3 différents types de cônes, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002).

Les cônes et les bâtonnets ne sont pas uniformément répartis sur la rétine. Comme le montre la Figure 9, il apparaît que la concentration en cônes est beaucoup plus forte dans la fovéa que dans la rétine périphérique. A l'inverse, les bâtonnets sont absents de la fovéa et sont majoritairement présents en rétine périphérique.

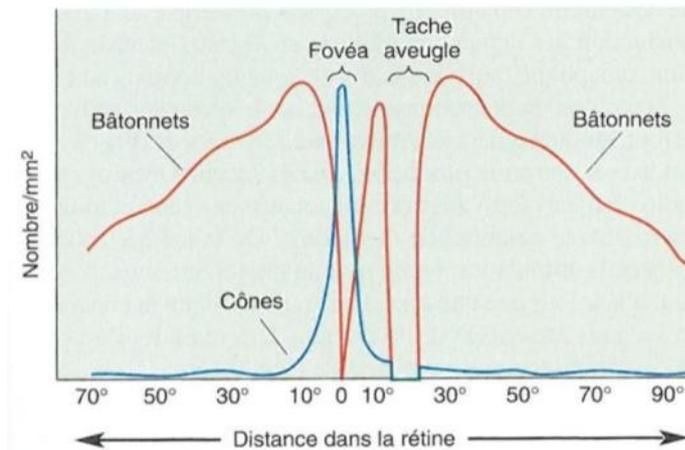


Figure 9 – Répartition des cônes et des bâtonnets sur la rétine, d’après (Bear, Connors et Paradiso 2002).
 Les cônes sont situés principalement dans la fovéa alors que les bâtonnets sont majoritairement présents en rétine périphérique. La tache aveugle ne contient aucun photorécepteur.

Les photorécepteurs ne sont pas les seules parties de la rétine à posséder différentes sous-catégories. Les cellules ganglionnaires peuvent également être classées en plusieurs grandes familles. Dans les études menées sur des rétines de chats, entre autres par (Enroth-Cugell et Robson 1984), les cellules sont classées en (α , β , γ et δ) selon leur taille ou en (W, X et Y) en fonction de la caractéristique de la réponse visuelle. Cette classification a inspiré les travaux initiés par (Watanabe et Rodieck 1989) et poursuivis plus tard par (Kaplan et Benardete 2001) sur les rétines de macaques, plus proches des rétines humaines. Ces travaux ont mis en évidence l’existence de 2 types majeurs de cellules ganglionnaires : les grandes cellules de type M (pour *magnus*, « grand » en latin) et les plus petites de type P (pour *parvus*, « petit » en latin). La Figure 10 montre leurs tailles relatives. Environ 90 % des cellules ganglionnaires sont de type P et 5 % de type M, les 5% restants étant des cellules ganglionnaires encore non caractérisées.

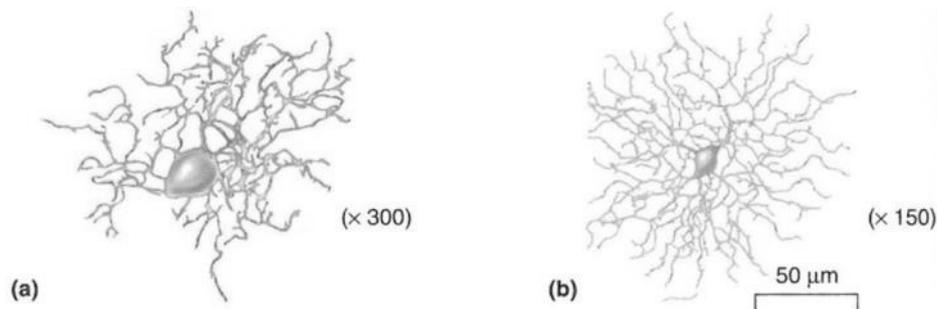


Figure 10 – Cellules ganglionnaires de type P et M de la rétine du macaque, d’après (Watanabe et Rodieck 1989).
 Petite cellule de type P en (a) et grande cellule de type M en (b).

Au-delà de leurs différences de taille, les cellules ganglionnaires de type P et de type M présentent également des différences au niveau de leur réponse. Les cellules M propagent leurs potentiels d’action à une vitesse plus élevée que les cellules P. De plus, elles répondent à un stimulus par une brève salve de potentiels d’action, quelle que soit la durée du stimulus. A l’inverse, les cellules P répondent aussi longtemps que le stimulus agit (Figure 11). Les cellules M semblent donc prédisposées à la détection du mouvement, tandis que les cellules P sont plus sensibles aux détails et à la forme du stimulus.

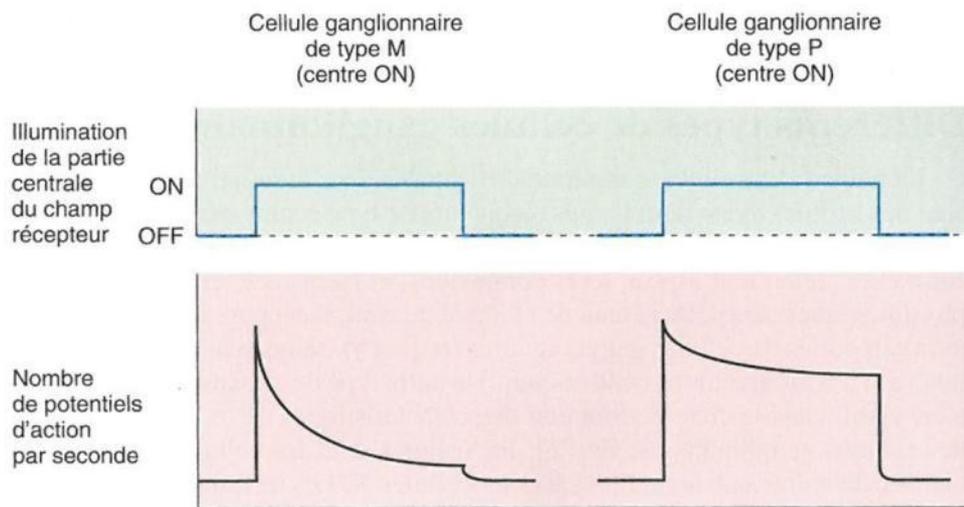


Figure 11 – Réponses des cellules ganglionnaires de type M et de type P, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002)

On peut également noter des différences au niveau de la répartition de ces cellules. Les cellules ganglionnaires de type M sont présentes majoritairement dans la rétine périphérique. Les cellules ganglionnaires de type P, étant le type majoritaire, sont présentes sur toute la rétine, mais on note une certaine concentration autour de la fovéa.

2.2.3. Conclusion

Cette analyse du fonctionnement de l'œil, et plus particulièrement de la rétine, met principalement en avant les différences qu'il peut exister entre la vision centrale (macula et fovéa) et la vision périphérique (rétine périphérique).

Premièrement au niveau des photorécepteurs, la rétine centrale présente une forte concentration en cônes et une quasi-absence de bâtonnets, ce qui en fait la zone privilégiée pour la détection des couleurs et la vision en forte luminosité (vision de jour). A l'inverse, la rétine périphérique possède une grande quantité de bâtonnets et est quasiment dépourvue de cônes. Elle sert donc principalement pour la vision en faible luminosité (vision de nuit).

Deuxièmement au niveau des cellules ganglionnaires, la rétine centrale (à l'inverse de la rétine périphérique) possède plus de cellules M que de cellules P. Les cellules M, de par leur plus grande taille, sont plus sensibles aux faibles variations. De plus, par rapport aux cellules P, leur vitesse de communication est plus élevée et leurs réponses, tout en étant plus courtes, sont également plus intenses. Ce sont donc des cellules de prédilection pour la détection de mouvement, alors que les cellules P sont plus performantes pour la détection de formes et de détails du stimulus.

On voit donc qu'un premier traitement de l'information visuelle se fait au sein de l'œil, avant même d'être transmise au cerveau. La vision centrale est utilisée pour la détection des formes et des couleurs, alors que la vision périphérique est utilisée pour la détection du mouvement et pour la vision de nuit.

2.3. Modalité vestibulaire

Situé dans l'oreille interne (Figure 12), le système vestibulaire (ou labyrinthe vestibulaire, Figure 13) est un organe servant pour la perception de la position et des déplacements de la tête (Graf et Klam 2006). Le fonctionnement du système vestibulaire repose principalement sur des cellules ciliées.

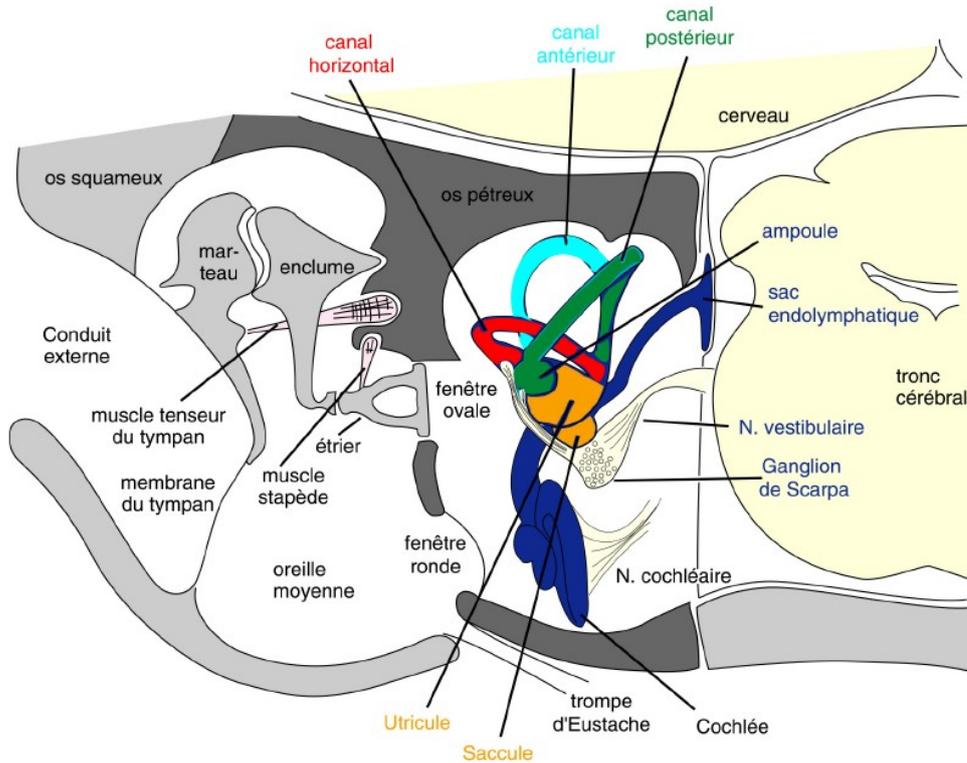


Figure 12 – Schéma de l'oreille humaine en coupe sagittale, d'après (Graf et Klam 2006)

Le système vestibulaire est l'organe de l'oreille interne regroupant les canaux semi-circulaires (canal horizontal, canal antérieur et canal postérieur) et les organes à otolithes (utricule et saccule).

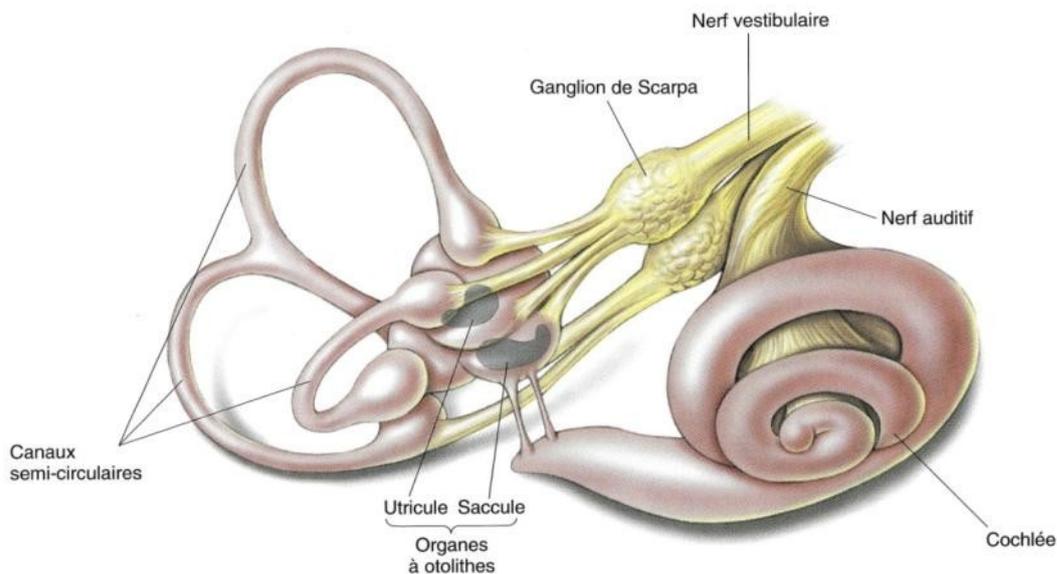


Figure 13 - Le système vestibulaire de l'Homme, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002)

Le système vestibulaire est constitué de 2 organes à otolithes : l'utricule et le saccule servant pour la détection de l'inclinaison de la tête et des accélérations linéaires, et de 3 canaux semi-circulaires perpendiculaires deux à deux, servant à la détection des accélérations angulaires.

Le système vestibulaire est composé de deux types d'organes : les canaux semi-circulaires (au nombre de 3) et les organes à otolithe (ou organes otolithiques, au nombre de 2). Nous allons voir que ces deux types d'organes présentent des similarités dans leurs fonctionnements et servent à fournir au cerveau des informations spatiales sur la position et les mouvements de la tête. Cependant les types d'informations perçues sont bien distincts. Les canaux semi-circulaires réagissent aux accélérations angulaires de la tête, alors que les organes à otolithes réagissent aux accélérations linéaires ainsi qu'à l'inclinaison de la tête.

Le système vestibulaire, en informant sur la position et l'orientation de la tête, donne le sens de l'équilibre et sert pour la coordination des mouvements de la tête et des yeux, ainsi que pour l'ajustement de la posture du corps. Le système vestibulaire intervient en permanence et de façon inconsciente (réflexe) pour le contrôle de l'équilibre. On ne prend conscience de son existence qu'en cas de conflit fort ou prolongé avec les autres sens, comme par exemple en cas de mal des transports, d'intoxication alcoolique aiguë, ou encore de vertiges. Notons également que les indices vestibulaires ne peuvent pas être interrompus, comme peuvent l'être les indices visuels en fermant les yeux par exemple, ou encore les indices sonores en se bouchant les oreilles.

2.3.1. Les canaux semi-circulaires

Les canaux semi-circulaires sont sensibles aux mouvements de rotation de la tête. Ils sont au nombre de 3 par système vestibulaire (canal horizontal, canal antérieur, et canal postérieur) car comme nous évoluons dans un univers en 3 dimensions, il est en effet important de pouvoir percevoir toutes les rotations de la tête. La Figure 14 présente la position des systèmes vestibulaires et l'orientation des canaux semi-circulaires par rapport à la tête.

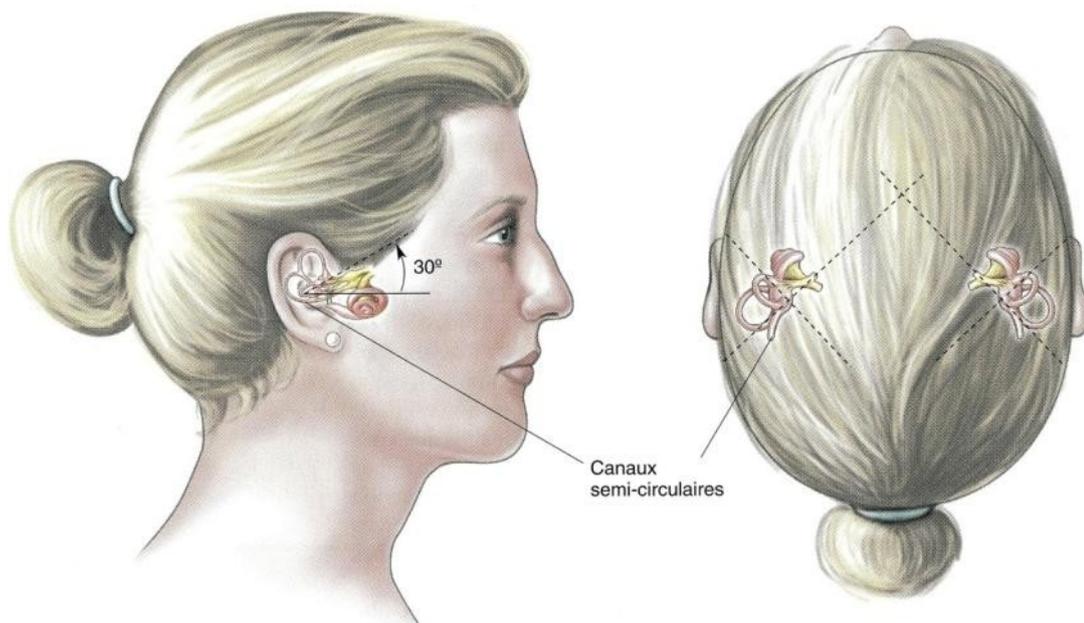


Figure 14 – Position et orientation des systèmes vestibulaires et des canaux semi-circulaires, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002)

Les canaux semi-circulaires d'un même système vestibulaire sont contenus dans des plans perpendiculaires deux à deux. Les 2 systèmes vestibulaires sont positionnés de façon symétrique (en « miroir »). Les plans des canaux semi-circulaires des 2 systèmes vestibulaires sont parallèles entre eux : les canaux semi-circulaires fonctionnent ainsi par couple.

Les canaux semi-circulaires sont contenus dans des plans orthogonaux deux à deux. Contrairement à ce qu'on pourrait penser au premier abord, ces plans ne sont pas parallèles aux plans corporels principaux (horizontal, frontal et sagittal). Le canal horizontal est incliné d'un angle d'environ 25 à 30°, et les canaux antérieur et postérieur sont inclinés d'un angle d'environ 45°. Il n'existe pas encore d'explication quant à la raison de ces inclinaisons. Cependant, il a été constaté que les muscles oculaires sont orientés de la même manière. Le changement de repère pour le mouvement des yeux lors du réflexe vestibulo-oculaire est donc plus simple et peut de ce fait s'opérer plus rapidement (Graf et Klam 2006).

De par la symétrie bilatérale de la tête et l'inclinaison à 45° des canaux antérieurs et postérieurs, les canaux semi-circulaires des deux systèmes vestibulaires fonctionnent par couple. On a en effet :

- les deux canaux horizontaux qui sont coplanaires ;
- le plan du canal antérieur gauche qui est parallèle à celui du canal postérieur droit ;
- et le plan du canal postérieur gauche qui est parallèle à celui du canal antérieur droit.

Les plans canaux étant parallèles deux à deux, les canaux semi-circulaires ont des axes de rotation privilégiés identiques deux à deux. Ils fonctionnent donc par couple. De plus, par symétrie, lorsqu'un canal est excité, l'autre est inhibé. La Figure 15 montre les couples inhibé / excité (*push/pull* en anglais) formés par les canaux semi-circulaires :

- Canal horizontal gauche / canal horizontal droit
- Canal antérieur gauche / canal postérieur droit
- Canal postérieur gauche / canal antérieur droit

Dans l'exemple d'une rotation de la tête vers la droite dans le plan horizontal, le canal horizontal droit est excité alors que le canal horizontal gauche est inhibé.

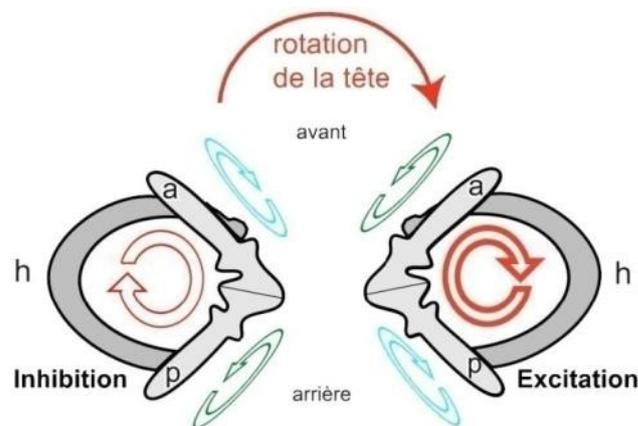


Figure 15 – Fonctionnement par couple des canaux semi-circulaires, d'après (Klam 2003).

Les canaux semi-circulaires fonctionnent par couple inhibé / excité : canal horizontal gauche avec canal horizontal droit, canal antérieur gauche avec canal postérieur droit, canal postérieur gauche avec canal antérieur droit. Dans le cas par exemple d'une rotation de la tête vers la droite dans le plan horizontal, le canal horizontal droit est excité, alors que le canal horizontal gauche est inhibé.

Voyons maintenant de façon plus approfondie leur fonctionnement. Sortes de petits tuyaux d'un diamètre de 6 millimètres environ, les canaux semi-circulaires sont remplis d'un liquide visqueux, l'endolymphe. A la base de ces canaux se trouve une protubérance : la crête ampullaire (Figure 16), dénommée aussi plus simplement ampoule. C'est dans cette crête ampullaire que se trouvent les cellules ciliées. Leurs cils sont

enchâssés dans la cupule, sorte de capsule formée de fibres gélatineuses, qui est elle-même entourée de l'endolymphe qui remplit le canal.

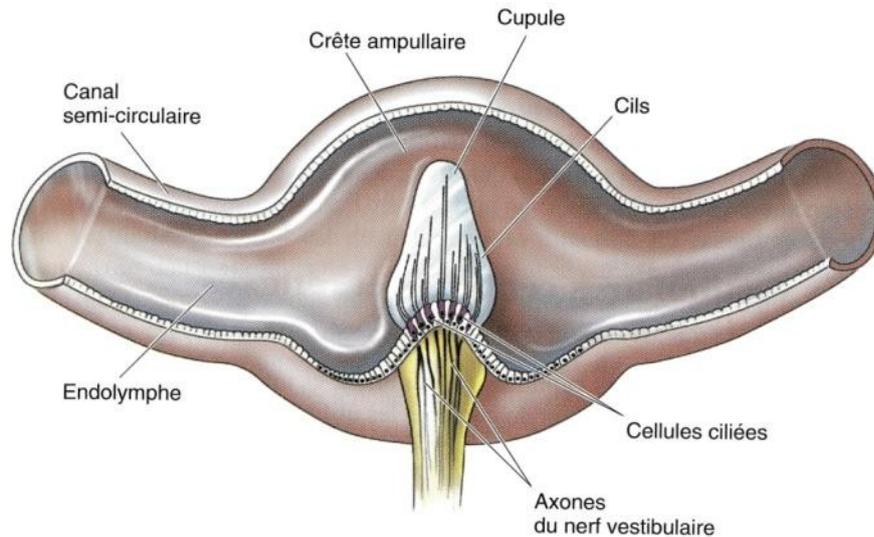


Figure 16 – Vue en coupe de la crête ampullaire d'un canal semi-circulaire, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002)

En cas de rotation, l'endolymphe tend, par inertie, à rester immobile dans le repère terrestre, et donc à se déplacer dans le sens contraire de la rotation du canal dans un repère lié au canal (Figure 17). L'axe perpendiculaire au plan d'un canal semi-circulaire est l'axe de rotation privilégié de ce canal, c'est-à-dire qu'une rotation autour de cet axe provoque une réponse neuronale maximale.

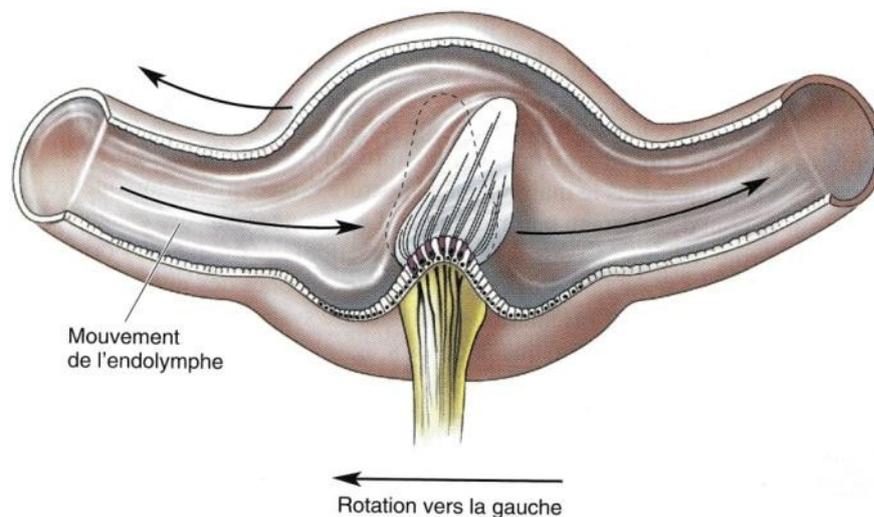


Figure 17 – Mouvement de l'endolymphe et de la crête ampullaire lors d'une rotation du canal semi-circulaire vers la gauche, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002)

Lorsque l'endolymphe se déplace, elle exerce une force de pression sur la cupule, comme le fait le vent sur une voile et courbe la cupule. Les cils se retrouvent alors inclinés. En fonction de cette inclinaison, le message nerveux délivré par les cellules ciliées au cerveau par l'intermédiaire du nerf vestibulaire se retrouve alors modifié (Figure 18). Tout comme les cellules ganglionnaires de la rétine, les cellules ciliées envoient des informations au cerveau sous forme de potentiels d'action.

Les cellules ciliées sont composées de plusieurs stéréocils et d'un kinocil. Lorsque les cils sont au repos, la cellule ciliée décharge toniquement. Si les stéréocils sont déviés vers le kinocil, la fréquence de décharge de la cellule ciliée augmente : on dit que la cellule est excitée. Si les stéréocils sont inclinés dans le sens opposé, la fréquence de décharge de la cellule ciliée diminue : on dit que la cellule est inhibée. L'information relative à l'inclinaison des cils est donc transmise au cerveau par un signal modulé en fréquence.

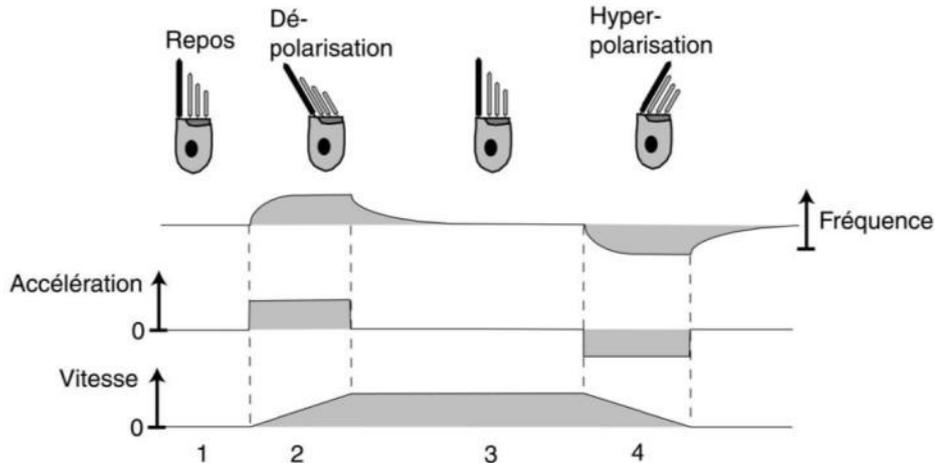


Figure 18 – Modification du signal transmis par les cellules ciliées d'un canal semi-circulaire en fonction de l'inclinaison des cils, d'après (Klam 2003).

La fréquence des impulsions émises par les cellules ciliées est augmentée (cellule ciliée excitée) lorsque les cils sont inclinés vers le kinocil (grand cil noir) et diminuée (cellule ciliée inhibée) lorsque les cils sont inclinés à l'opposé du kinocil.

La Figure 18 présente un cas simple. Dans la phase (1), la vitesse et l'accélération angulaire de la tête sont nulles, la cellule ciliée est au repos. Elle décharge toniquement. Dans la phase (2), la vitesse augmente (accélération positive), les stéréocils sont inclinés vers le kinocil, la cellule est excitée, et sa fréquence de décharge augmente jusqu'à une valeur maximale proportionnelle à l'inclinaison des cils. Dans la phase (3), la vitesse est constante, l'accélération est nulle, et donc les cils reviennent à la verticale. La fréquence de décharge de la cellule ciliée diminue alors pour revenir à la valeur de la phase (1). Enfin, dans la phase (4), la vitesse diminue (accélération négative), les stéréocils se retrouvent donc inclinés à l'opposé du kinocil, la cellule ciliée est inhibée et sa fréquence de décharge diminue jusqu'à une valeur minimale proportionnelle à l'inclinaison des cils. On voit par cet exemple que les canaux semi-circulaires ne distinguent pas l'immobilité (phase 1) d'une rotation à vitesse constante (phase 3). Ils renvoient donc bien une information sur l'accélération angulaire de la tête.

Toutefois, on peut également remarquer qu'au début de la phase (3) et après la phase (4), la réponse des canaux semi-circulaires ne revient pas instantanément à celle de la phase (1). Même si les canaux semi-circulaires sont effectivement sensibles aux accélérations angulaires, ils sont parfois considérés dans la littérature comme des capteurs fournissant une information de vitesse angulaire. Par exemple, dans leur *Motion Perception Toolbox*, (Wentink, et al. 2006), en s'inspirant des travaux de (van Egmond, Groen et Jongkees 1949) et (Heerspink, et al. 2005) proposent de modéliser la réponse des canaux semi-circulaires par la fonction de transfert suivante (dans le domaine de Laplace) :

$$H_{SCC}(s) = \frac{\text{vitesse angulaire perçue}}{\text{accélération angulaire de la tête}} = K \cdot \frac{1 + \tau_L \cdot s}{1 + \tau_I \cdot s}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} K = 5.9 \\ \tau_L = 0.11 \\ \tau_I = 5.9 \end{cases}$$

Cette fonction donne la vitesse angulaire perçue en fonction de l'accélération angulaire de la tête. La vitesse angulaire perçue s'entend perçue « uniquement » par les canaux semi-circulaires. Les interactions avec les vitesses angulaires perçues par d'autres modalités sensorielles (notamment visuelle) ne sont pas prises en compte dans cette modélisation. La Figure 19 présente la vitesse angulaire perçue pour un exemple d'accélération angulaire de la tête similaire à celui de la Figure 18.

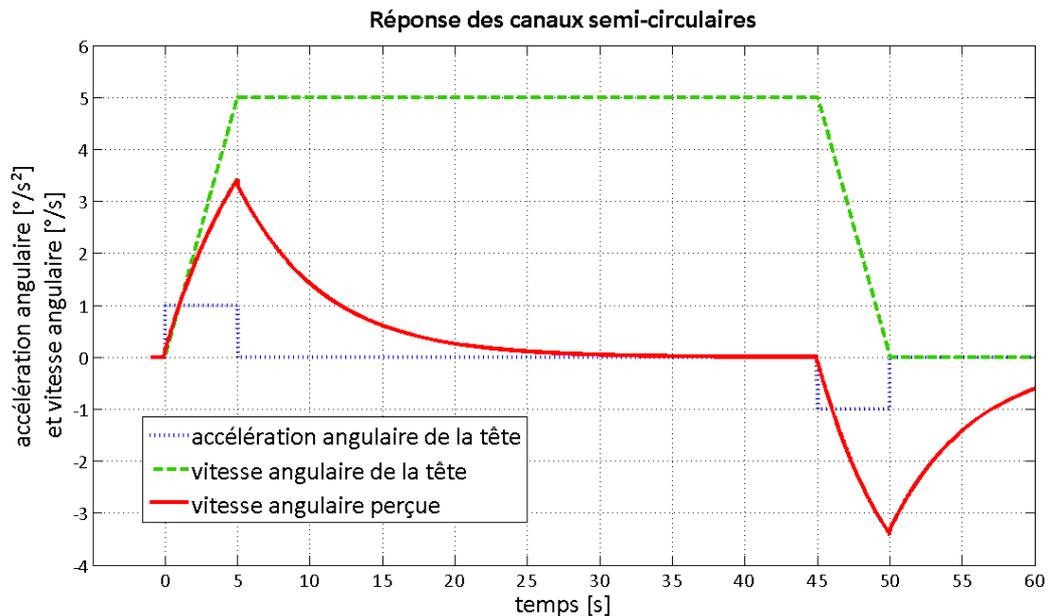


Figure 19 – Réponse des canaux semi-circulaires.

La courbe rouge correspond à la réponse des canaux semi-circulaires pour un exemple d'accélération angulaire de la tête (en pointillés bleus) selon le modèle utilisé par (Wentink, et al. 2006) pour leur Motion Perception Toolbox. La vitesse de rotation de la tête correspondante est représentée en tirets verts.

Cette figure nous montre que les canaux semi-circulaires réalisent à la fois une intégration (terme τ_I) et un filtrage passe-bas (terme τ_L). La courbe de la vitesse angulaire perçue (en rouge) correspond en effet à un filtrage passe-bas de la vitesse angulaire de la tête (en pointillés verts). On a donc une première explication quant à la considération des canaux semi-circulaires comme des capteurs de vitesse angulaire et non d'accélération angulaire. Dans ce cas, ils n'effectuent alors plus qu'un filtrage passe-bas de la vitesse angulaire de la tête.

On peut également voir sur la Figure 19 « l'inertie » importante (de l'ordre de 20 secondes) des canaux semi-circulaires lorsque l'accélération angulaire s'annule, c'est-à-dire lorsque la vitesse angulaire est constante. La tête étant rarement immobile (ou à vitesse angulaire constante) sur une durée aussi longue, on se rend compte qu'il est alors très rare que les canaux semi-circulaires ne renvoient aucune information. Cette particularité a également renforcé l'idée que les canaux semi-circulaires puissent être considérés comme des capteurs de vitesse angulaire.

2.3.2. Les organes otolithiques : le saccule et l'utricule

L'utricule et le saccule sont les deux organes à otolithes (ou organes otolithiques) du système vestibulaire (Figure 13) permettant de percevoir les accélérations rectilignes et l'inclinaison de la tête. Comme les canaux semi-circulaires, les organes à otolithes possèdent des cellules ciliées fonctionnant par émission de potentiels d'action.

Chaque organe à otolithe possède une zone sensorielle appelée macula (à ne pas confondre avec la macula de l'œil). La Figure 20 montre l'orientation des maculae de l'utricule et du saccule. Celle de l'utricule est globalement horizontale, alors que celle du saccule est orientée plus ou moins verticalement. Dans chacune de ces maculae, l'orientation des cellules ciliées n'est pas identique en chaque endroit. Ceci afin que pour chaque direction potentielle de déplacement de la tête corresponde un couple de cellules ciliées avec cette direction et son opposé comme directions préférentielles. En d'autres termes : chaque déplacement de la tête excitera certaines cellules ciliées, en inhibera d'autres, et n'aura aucun effet sur les restantes. De plus, ce phénomène se retrouvera à l'opposé sur le saccule (ou l'utricule) de l'autre oreille.

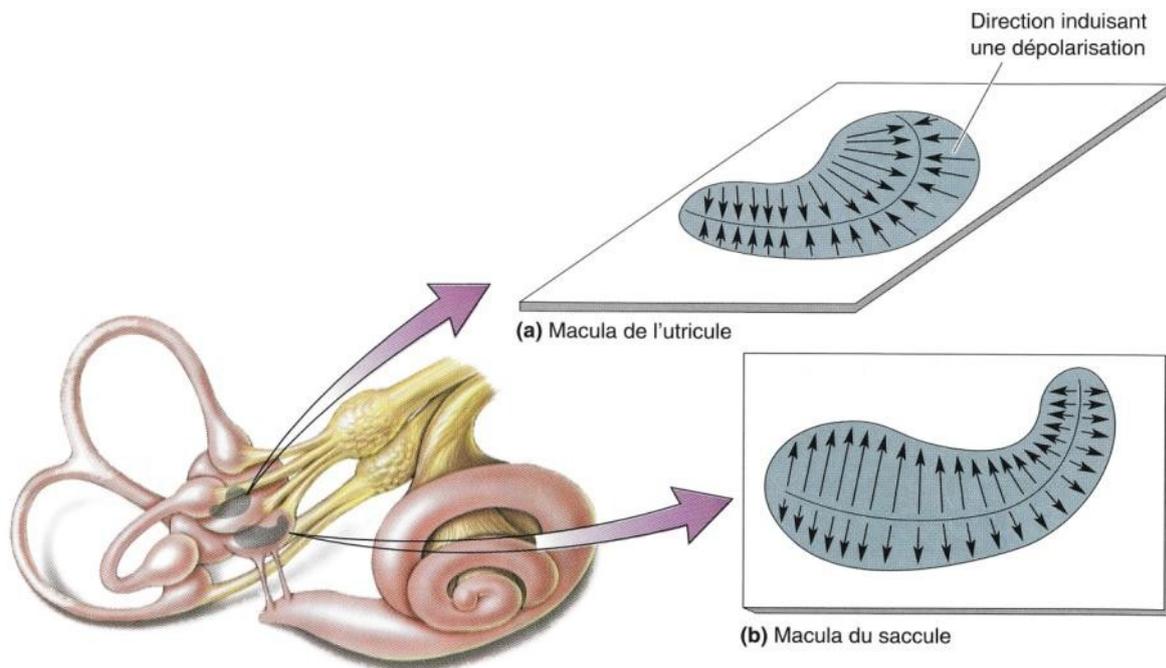


Figure 20 –Positions et orientations des maculae de l'utricule et du saccule, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002).

La macula est horizontale au niveau de l'utricule (a) et verticale au niveau du saccule (b). Les flèches issues de chaque macula montrent comment les cellules ciliées sont polarisées. Lorsque les cils se déplacent dans la direction des flèches fines, les cellules ciliées sont excitées.

Les maculae de l'utricule et du saccule fonctionnent de la même manière. Elles sont composées de 3 couches (Figure 21) : la couche inférieure est composée des bases des cellules ciliées et de cellules de soutien. Elle est solidaire du système vestibulaire, et donc solidaire également de la tête lors de ses déplacements. La couche supérieure est composée de petits cristaux de carbonate de calcium dénommés « otolithes » (otolithe vient d'un mot grec qui signifie « pierre de l'oreille »), de 1 à 5 μm de diamètre. Les otolithes ont une densité supérieure à celle de l'endolymphe qui les entoure. Enfin, la couche intermédiaire faisant le lien avec les deux autres couches est faite d'une cape gélatineuse dans laquelle sont enchâssés les cils des cellules ciliées.

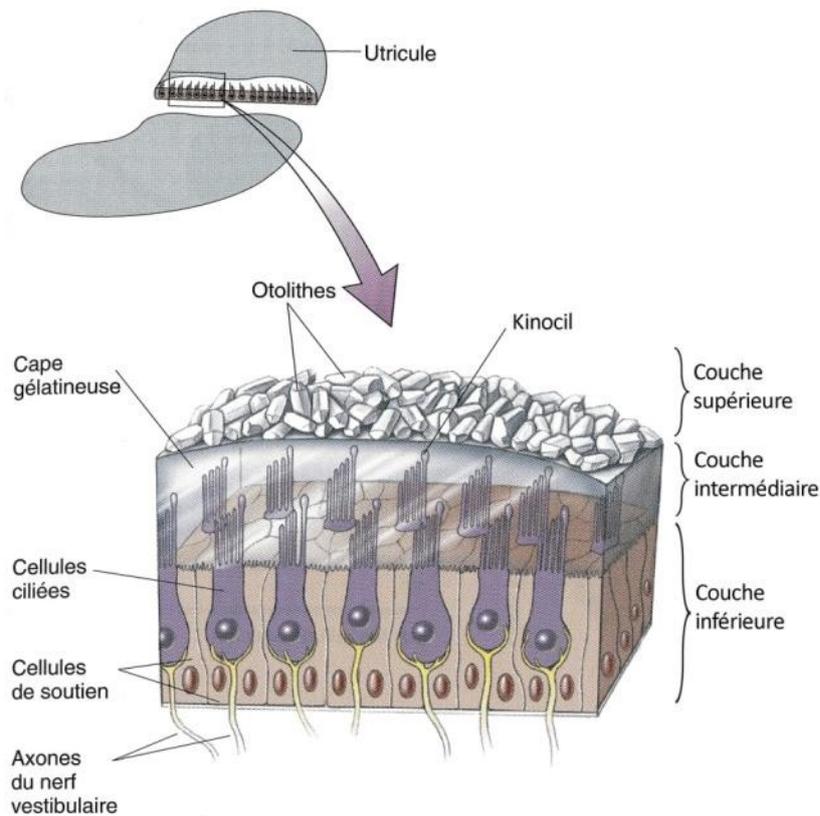


Figure 21 – Vue en coupe schématique de la macula de l'utricule, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002). La macula est organisée en 3 couches : la couche inférieure est solidaire de la tête et maintient les cellules ciliées ; la couche supérieure est composée des otolithes ; la couche intermédiaire, composée d'une cape gélatineuse dans laquelle sont enchâssés les cils des cellules ciliées, fait le lien entre les 2 autres couches.

Lorsque la tête est accélérée, les otolithes ont tendance par inertie à rester immobiles dans le référentiel terrestre et donc à se déplacer dans le sens inverse du mouvement de la tête dans un référentiel lié au système vestibulaire. La couche supérieure et la couche inférieure exercent donc un effort de cisaillement de la couche intermédiaire qui a pour effet d'incliner les cils (Figure 22). De même, lorsque la tête est inclinée, les otolithes se déplacent « vers le bas » par gravité, et les couches supérieure et inférieure exercent à nouveau une force de cisaillement sur la couche intermédiaire entraînant l'inclinaison des cils.

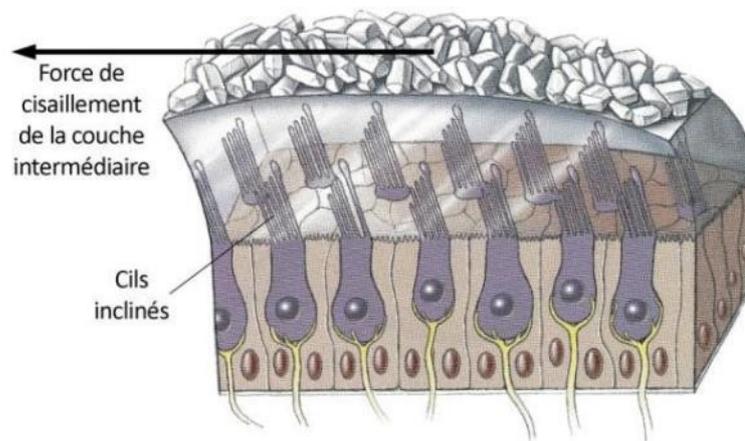


Figure 22 – Fonctionnement des maculae de l'utricule et du saccule. Lorsque la couche supérieure et la couche inférieure de la macula n'ont pas le même déplacement, la couche intermédiaire est alors déformée par cisaillement, ce qui a pour effet d'incliner les cils.

Que ce soit lorsque la tête est inclinée ou lorsque la tête est accélérée dans le plan horizontal, les organes otolithiques sont sollicités. En effet, comme le montre la Figure 23, une inclinaison de la tête ou une accélération dans le plan horizontal va provoquer l'inclinaison des cils des cellules ciliées des organes otolithiques.

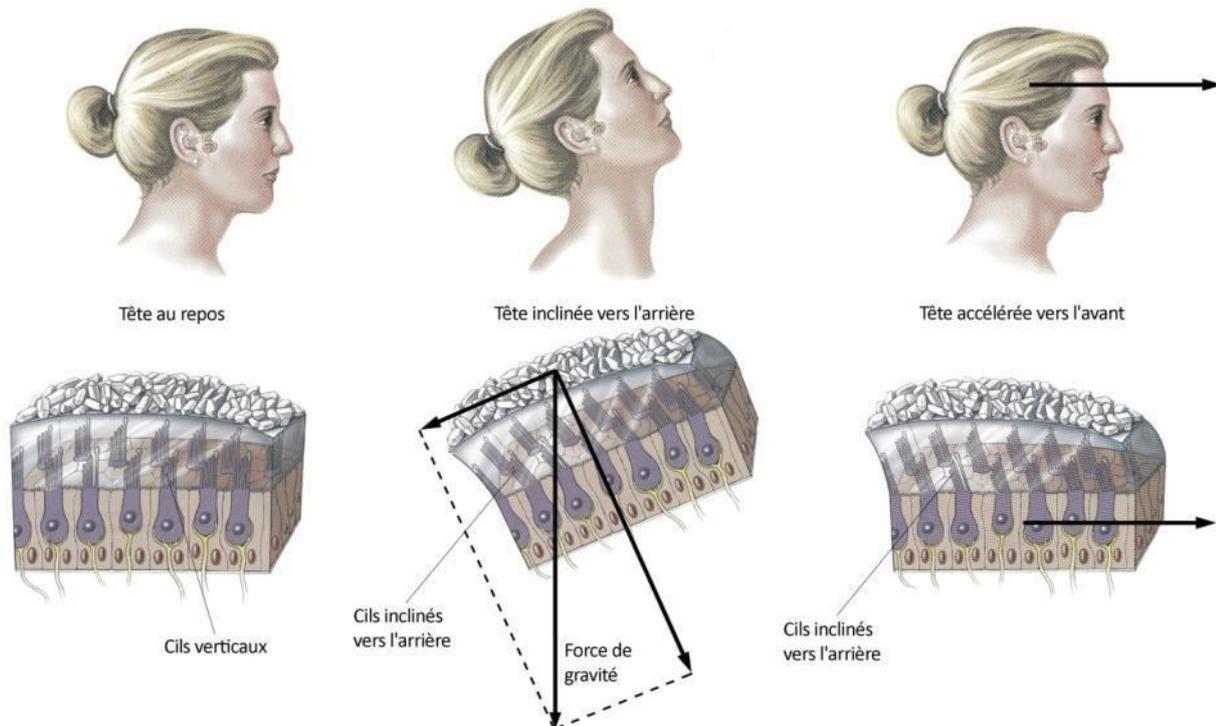


Figure 23 – Distinction entre accélération horizontale et inclinaison de la tête, d'après (Bear, Connors et Paradiso 2002).

Les organes otolithiques sont indistinctement excités par une inclinaison de la tête ou par une accélération dans le plan horizontal.

Lorsque la tête est au repos, les cils des cellules ciliées des organes otolithiques ne sont pas inclinés. Si la tête est inclinée vers l'arrière, une composante de la gravité (celle dans le plan de la macula au point considéré) vient déplacer les otolithes vers l'arrière de la tête et incline ainsi les cils vers l'arrière. Si la tête est accélérée vers l'avant, les otolithes tendent par inertie à rester immobiles dans un référentiel terrestre et se déplacent donc vers l'arrière de la tête, et les cils se retrouvent inclinés vers l'arrière. Dans les 2 cas où la tête est inclinée vers l'arrière ou accélérée vers l'avant, les cils sont inclinés vers l'arrière. On peut facilement étendre cet exemple à une accélération dans n'importe quelle direction du plan horizontal et l'inclinaison correspondante. On voit ainsi que les organes otolithiques sont ainsi indistinctement excités par une accélération dans le plan horizontal ou par une inclinaison de la tête⁴.

Contrairement aux canaux semi-circulaires qui, comme nous avons pu le voir précédemment, ont un temps de réponse assez long, les organes otolithiques ont quant à eux un temps de réponse beaucoup plus court. On trouve dans la littérature des modélisations de la réponse des organes à otolithes comme par exemple celle de la *Motion Perception Toolbox* de (Wentink, et al. 2006). La fonction proposée est de la même forme

⁴ Notons toutefois qu'il est aisé de faire cette distinction dans la vie de tous les jours : les organes otolithiques ne sont en effet pas les seuls organes permettant au corps humain de percevoir le mouvement. L'ambiguïté entre accélération dans le plan horizontal et inclinaison de la tête est résolue principalement grâce à la vision et aux canaux semi-circulaires.

que celle proposée pour les canaux semi-circulaires. Seules les valeurs des constantes de temps changent.

$$H_{oto}(s) = \frac{\text{force vestibulaire perçue}}{\text{somme des forces appliquées}} = K \cdot \frac{1 + \tau_L \cdot s}{1 + \tau_I \cdot s} = 1 + \frac{(\tau_L - \tau_I) \cdot s}{1 + \tau_I \cdot s}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} K = 1 \\ \tau_L = 0.3 \\ \tau_I = 0.12 \end{cases}$$

Cette fonction prend en entrée la somme des forces appliquées, c'est-à-dire la somme des forces résultant des accélérations subies, et donne en sortie la force vestibulaire perçue. On peut mettre cette fonction sous la forme :

$$H_{oto}(s) = 1 + \frac{(\tau_L - \tau_I) \cdot s}{1 + \tau_I \cdot s}$$

La réponse des organes otolithiques apparaît alors comme la somme de l'accélération subie d'une part et du filtrage passe-haut de l'accélération subie (de gain $(\tau_L - \tau_I)$ et de constante de temps τ_I) d'autre part. La Figure 24 présente la force vestibulaire perçue en fonction de la somme des forces appliquées, pour 2 profils différents en entrée afin d'illustrer l'apport du filtrage passe-haut.

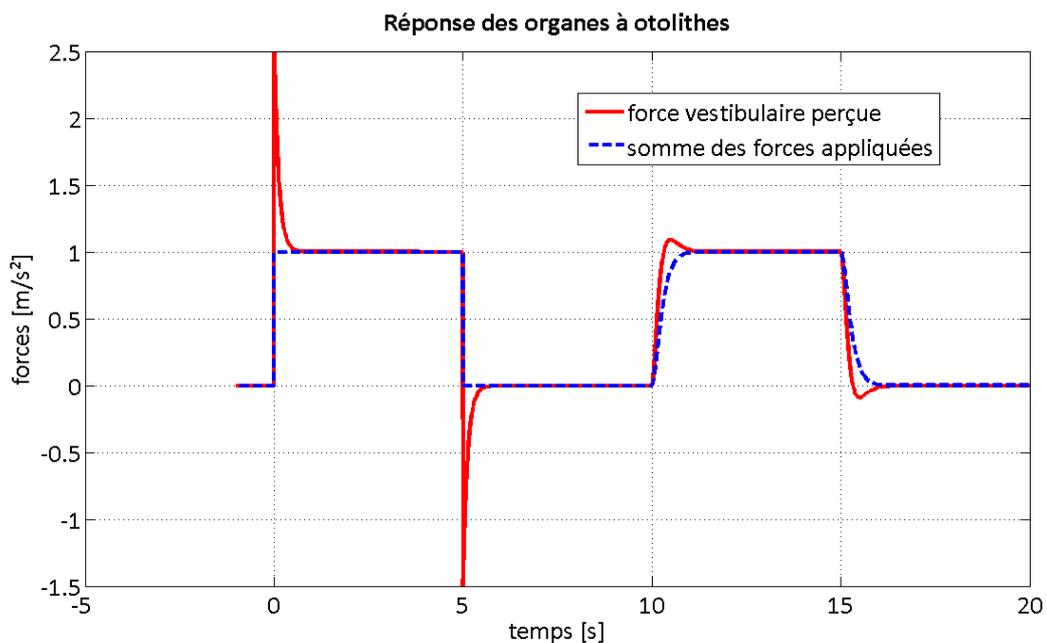


Figure 24 - Réponse des organes à otolithes.

La courbe rouge correspond à la réponse des organes à otolithes pour un exemple d'accélération de la tête (en pointillés bleus) selon le modèle utilisé par (Wentink, et al. 2006) pour leur Motion Perception Toolbox.

Le partie passe-haut de la réponse représente la sensibilité humaine au jerk, en d'autres termes la dérivée temporelle de l'accélération. Dans la plupart des cas, le jerk agit comme une sorte d'« indice d'alerte » (Berthoz 1995) et est habituellement clairement perçu par l'homme. Plus le jerk sera important, c'est-à-dire plus l'accélération changera rapidement, et plus la réponse des organes otolithiques sera importante également. Par exemple en fin de freinage dans une voiture, si le conducteur ne relâche pas un peu la pédale de frein, le jerk sera important et clairement ressenti.

Si on reprend la Figure 24, la partie correspondant à ces secousses (filtrage passe-haut) est tout simplement la différence entre les 2 courbes. Le premier profil d'accélération est un créneau avec un changement brusque d'accélération : la réponse du filtre passe-haut est donc très importante. Le deuxième profil d'accélération est un créneau lissé : la réponse du filtre passe-haut est beaucoup moins prononcée que pour le premier profil.

2.3.3. Seuils de détection

Le fonctionnement des organes à otolithes et des canaux semi-circulaires n'est pas parfait : il existe un seuil de détection en dessous desquels ils ne sont pas activés. Pour des accélérations linéaires, le seuil se situe aux alentours de 5 cm/s^2 . Pour des mouvements longitudinaux, il serait de 3 cm/s^2 selon (Hamann, Schonfeld et Clarke 2001), 4.84 cm/s^2 selon (Gianna, Heimbrand et Gresty 1996) et 6.3 cm/s^2 selon (Benson, Spencer et Stott 1986). (Benson, Spencer et Stott 1986) mesurent également un seuil de 5.7 cm/s^2 pour des déplacements latéraux et un seuil de 15.4 cm/s^2 pour des déplacements verticaux.

Pour des accélérations angulaires, (Clark et Stewart 1968) situent ce seuil autour de $0,11 \text{ }^\circ/\text{s}^2$, alors que (Bringoux, et al. 2002) le situent plutôt entre $0,2$ et $2 \text{ }^\circ/\text{s}^2$. (Benson, Hutt et Brown 1989) ont mesuré ce seuil en fonction de l'axe de rotation et ont relevé un seuil de $1,4 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ pour des rotations autour de l'axe vertical (rotation de lacet), $2,04 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ autour de l'axe antéropostérieur (rotation de roulis) et enfin $2,07 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ autour de l'axe latéral (rotation de tangage). En présentant conjointement un mouvement visuel, (Groen et Bles 2004) obtiennent quant à eux un seuil de détection de $3 \text{ }^\circ/\text{s}$ pour des rotations de tangage.

Par ailleurs, ces seuils ne seraient apparemment pas constants : ils semblent varier en fonction des individus bien sûr, mais également en fonction de la durée du stimulus. (Rodenburg, Stassen et Maas 1981) montrent par exemple que le seuil de perception d'accélération angulaire dans le noir est :

$$a_{\text{seuil}} = \frac{0,22}{1 - e^{-\frac{t_s}{14,5}}} \text{ }^\circ/\text{s}^2, \text{ où } t_s \text{ est la durée du stimulus.}$$

2.3.4. Conclusion

Le système vestibulaire agit comme une centrale inertielle, renvoyant des informations à la fois sur les accélérations, l'inclinaison et les rotations de la tête. Comme pour la rétine avec l'information visuelle, on s'aperçoit qu'un premier traitement de l'information gravito-inertielle est fait avant même d'être renvoyé au cerveau. Ainsi, l'information renvoyée par les canaux semi-circulaires ne correspond pas à l'accélération angulaire, mais plutôt à un filtrage passe-haut de la vitesse de rotation de la tête. En d'autres termes, ils renvoient une information proche de la vitesse de rotation lorsque celle-ci varie, et aucune information lorsque la vitesse reste constante (qu'elle soit nulle ou non).

Concernant les organes otolithiques, il apparaît que le signal renvoyé correspond aux accélérations linéaires de la tête auquel s'ajoute un filtrage passe-haut de ces mêmes accélérations. Cela a pour conséquence d'intensifier le signal en cas de changement brusque d'accélération, c'est-à-dire lorsque le jerk est important. Une interprétation possible de ce phénomène est que les organes otolithiques agissent comme une sorte d'alarme qui s'enclencherait en cas de jerk important, pour déclencher des mécanismes de réflexe par exemple comme lors d'une chute.

2.4. Somesthésie ou modalité somatosensorielle

La plupart des gens connaissent le sens du toucher. En revanche peu connaissent le terme somesthésie et sa signification. La somesthésie, que l'on désigne parfois par sensibilité du corps, est une modalité sensorielle regroupant les différentes sensations retransmises par la peau (qu'on appelle le « toucher ») mais également par les articulations, les tendons, les viscères... Elle intègre également le sens de la douleur. De nombreux récepteurs répartis dans tout le corps nous permettent d'avoir des informations sur l'environnement, sur la position des membres, la température des différentes parties du corps...

2.4.1. Le toucher

La peau présente plusieurs types de récepteurs différents servant pour la détection de vibrations, d'efforts de pression, de pincements, de frottements... Toutes ces sensations sont détectées et parfaitement distinguées. Toutefois, la répartition de ces récepteurs sur la peau est irrégulière. Des zones comme les mains ou le visage en sont plus pourvues que des zones comme le dos ou la cuisse par exemple. L'Homonculus (Figure 25) est une caricature d'un homme dont les parties du corps seraient grossies proportionnellement à la densité des récepteurs sensoriels présents à la surface du corps.

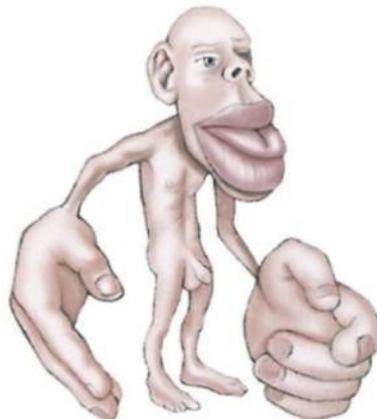


Figure 25 – Homonculus.

Caricature d'un homme pour lesquelles les organes sont grossis de façon proportionnelle à la densité des récepteurs sensoriels présents à la surface du corps.

Pendant la conduite, les récepteurs cutanés sont très sollicités, tout d'abord au niveau de la main pour le contact avec le volant. En effet, lorsqu'en sortie de virage par exemple on laisse doucement glisser le volant dans sa main pour ramener les roues en position neutre, ce sont les récepteurs liés au frottement qui nous permettent de réaliser cette action. La force exercée par les doigts sur le volant en dépend directement. Trop d'effort au niveau des doigts ne laisserait pas tourner le volant, et à l'inverse pas assez le laisserait tourner trop vite.

Les récepteurs liés à la pression sur la peau nous renseignent également sur l'accélération et le freinage du véhicule. Ils fournissent des informations complémentaires à celles fournies par le système vestibulaire. En effet, lors d'un freinage, le corps a tendance à être « projeté » vers l'avant (par rapport à la voiture). Et à l'inverse, le corps a tendance à se déplacer vers l'arrière de la voiture lors d'une accélération. Comme on est assis dans un

fauteuil et que l'on est attaché avec une ceinture de sécurité, la pression que ces deux éléments exercent, respectivement sur le dos et sur la poitrine, varie. Lors d'une accélération, la pression qu'exerce le fauteuil sur le dos augmente alors que celle de la ceinture sur la poitrine diminue. L'inverse se produit en cas de freinage.

2.4.2. Proprioception

Les informations somatosensorielles autres que celles relatives au toucher sont généralement regroupées autour du terme de proprioception. Tout comme le toucher, la modalité proprioceptive utilise plusieurs récepteurs différents. Toutefois, ils servent tous à fournir une information de position, que ce soit sur la position des membres ou des organes.

Chaque muscle est composé d'un assemblage de fibres musculaires. A l'intérieur même de ces fibres se trouvent des fuseaux neuromusculaires qui transmettent une information sur l'étirement du muscle. Il existe aussi des mécanorécepteurs articulaires (corpuscules de Raffini, corpuscules de Vater-Pacini) qui renvoient une information sur la position des articulations. Enfin, les organes tendineux de Golgi, situés comme leur nom l'indique dans les tendons (qui relient les muscles aux os), renvoient une information principalement sur la tension des muscles. Ainsi, à chaque instant, l'être humain est conscient (même avec les yeux fermés) de la position de ses membres et de l'effort exercé par les muscles pour être dans cette position.

Dans le cas qui nous intéresse, à savoir la conduite automobile, ces récepteurs vont apporter de nouvelles informations que le cerveau pourra utiliser pour créer la sensation de mouvement et connaître sa position dans l'espace. Par exemple, le simple fait de tourner le volant peut donner une information sur la vitesse de la voiture en fonction de l'effort qu'il a fallu pour le faire, de l'angle dont on a tourné le volant, etc. Les récepteurs proprioceptifs des muscles et des articulations qui ont servi à tourner le volant vont pouvoir fournir ces informations. Prenons un autre exemple. Lors d'un freinage ou d'une accélération, le conducteur cherche généralement à garder la tête verticale. L'effort que vont fournir les muscles du cou pour maintenir la tête verticale va dépendre directement de l'intensité de l'accélération (ou du freinage). Grâce aux organes tendineux de Golgi relatifs aux muscles du cou, cet effort va pouvoir être mesuré et interprété ensuite par le cerveau.

Les derniers types de récepteurs proprioceptifs sont ceux liés aux viscères, ces dernières pouvant se déplacer à l'intérieur du corps humain. Ils vont renvoyer une information au cerveau en fonction du déplacement des organes internes à l'intérieur du corps. Cependant, il faut que le corps humain soit soumis à une accélération pour que les organes internes se déplacent. Ainsi il est aisé de comprendre l'intérêt que peuvent avoir ces récepteurs pour la perception du mouvement.

2.4.3. Conclusion

La somesthésie apporte un grand nombre d'informations renforçant la sensation de mouvement. Cependant leur contribution est limitée par rapport aux apports des modalités visuelle et vestibulaire. Des études de seuils de détection du mouvement linéaire mentionnées par (Berthoz et Droulez 1982) montrent notamment la prédominance de la modalité vestibulaire.

2.5. Interactions multisensorielles

Nous allons à présent détailler dans cette partie les interactions physiques et physiologiques intervenant entre les différentes modalités sensorielles évoquées précédemment. Cependant les interactions intervenant au niveau de la perception subjective du mouvement ne seront pas abordées ici : ce sera l'objet du prochain chapitre.

2.5.1. Interactions visuo-vestibulaires

Il existe des interactions fortes entre les modalités visuelles et vestibulaires. Les aires du cerveau activées par ces deux modalités ont en effet des zones communes. (Waespe et Henn 1977) montrent que chez le primate, certains neurones vestibulaires répondent aussi bien à des stimulations visuelles qu'inertielles (Figure 26). De même certaines aires visuelles corticales répondent à des stimuli vestibulaires.

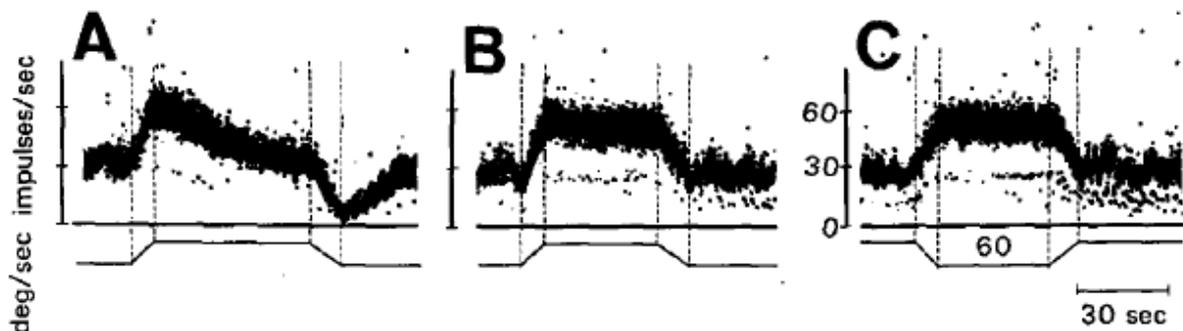


Figure 26 – Fréquence d'émission de potentiels d'actions d'un neurone des noyaux vestibulaires sous plusieurs stimulations, d'après (Waespe et Henn 1977).

Les données ont été collectées chez le singe éveillé :

- (A) pendant une rotation dans le noir,
- (B) pendant une rotation de l'environnement autour de l'animal immobile,
- (C) pendant une rotation à la lumière.

La Figure 26 illustre l'interaction qu'il peut exister à la source entre les modalités visuelles et vestibulaires. Dans le noir (cas A), les neurones vestibulaires répondent à la mise en rotation mais atténuent leur réponse en vitesse de rotation établie, comme nous l'avons vu précédemment lors de l'étude de la réponse des canaux semi-circulaires. Lorsque la stimulation est purement visuelle (cas B), on s'aperçoit que la réponse des neurones vestibulaires est quasi-identique à celle correspondant à une rotation à la lumière (cas C).

2.5.2. Activités réflexes vestibulaires, réflexe vestibulo-oculaire

Le système vestibulaire est l'organe humain de l'équilibre. Ainsi, en plus de renvoyer des informations au cerveau, les axones sortant du système vestibulaire projettent sur d'autres zones du corps (Klam 2003). Les axones des organes otolithiques par exemple projettent via le noyau vestibulaire latéral sur les motoneurones des muscles des membres inférieurs qui maintiennent la posture du corps. Ainsi, même sur le pont d'un navire sur une mer agitée, l'humain arrive à garder l'équilibre. Les axones des canaux semi-circulaires projettent quant à eux via le noyau vestibulaire médian sur les motoneurones des muscles du cou et des muscles extra-oculaires. Le but est de pouvoir stabiliser le regard rapidement et efficacement en gardant la tête verticale et en faisant tourner les yeux.

Cette fonction de stabilisation du regard est une des fonctions principales du système vestibulaire. Elle est réalisée de façon inconsciente par le Réflexe Vestibulo-Oculaire (RVO ou VOR pour *Vestibulo-Ocular Reflex*). Il se déclenche même sans stimulation visuelle (dans le noir ou les yeux fermés). On peut d'ailleurs sentir à travers la paupière fermée le mouvement de l'œil induit par le RVO en posant doucement son doigt sur sa paupière et en tournant rapidement la tête. Sans le RVO, le simple fait de marcher serait quasiment impossible. Pour mieux comprendre son intérêt, il suffit d'imaginer la comparaison entre ce qu'on voit en marchant, et ce qu'on verrait au travers d'une caméra sans stabilisateur qui serait fixée à la tête. Ce n'est pas sans raison que les cinéastes utilisent de préférence des caméras sur rail pour leurs films. La Figure 27 illustre le fonctionnement du RVO pour la rotation horizontale de l'œil, tel qu'il est décrit par (Robinson 1977).

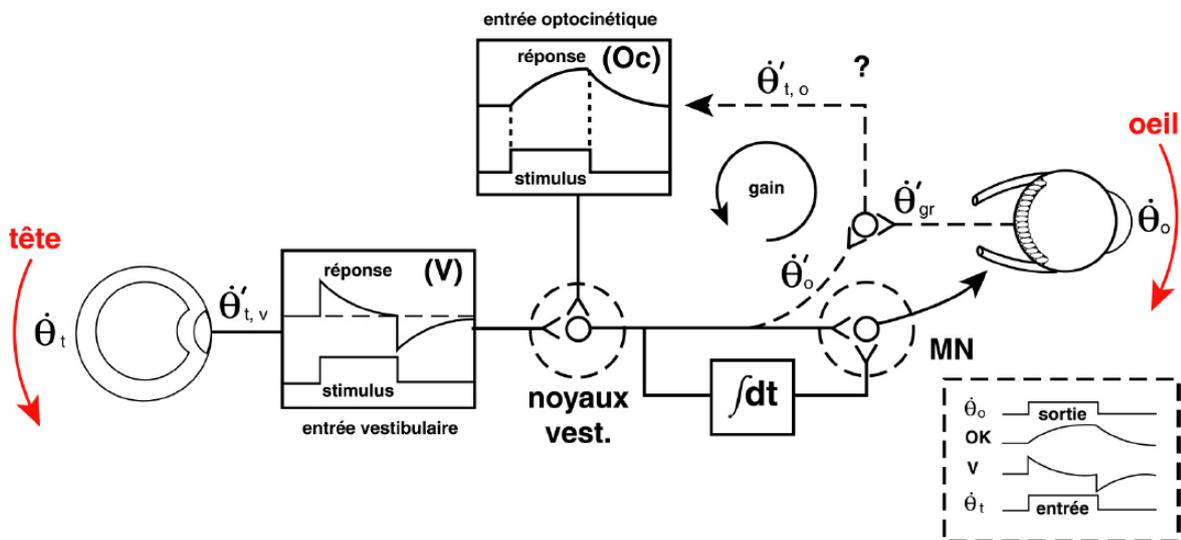


Figure 27 – Mécanisme du Réflexe Vestibulo-Oculaire, d'après (Robinson 1977) et repris par (Klam 2003).

Dans l'exemple de la Figure 27, on voit que la rotation de la tête provoque la rotation de l'œil dans le sens contraire afin de stabiliser l'image. (Graf et Klam 2006) remarquent à ce propos que les orientations des plans des canaux semi-circulaires et des directions de traction des muscles extra-oculaires sont pratiquement en correspondance (Figure 28). Comme les rotations dans l'espace ne sont pas commutatives, leur hypothèse est que cette quasi-correspondance évite d'avoir à calculer un changement de repère et participe donc à la rapidité d'exécution du RVO. Le canal semi-circulaire postérieur est ainsi directement en relation avec les muscles extra-oculaires obliques, le canal antérieur avec les muscles verticaux, et le canal horizontal avec les muscles horizontaux. Le RVO est très rapide : il ne prend que 16 ms au lieu de 80 à 150 ms pour un réflexe équivalent visuel, le réflexe optocinétique.

Le réflexe optocinétique, appelé également nystagmus optocinétique, est un mouvement involontaire de l'œil qui a également pour but de stabiliser l'image sur la rétine. Par rapport au réflexe vestibulo-oculaire, il est activé par une entrée visuelle. Lorsque l'image rétinienne se déplace, l'œil tourne d'abord lentement en sens contraire pour stabiliser l'image. Puis, lorsque l'œil atteint un angle critique, il revient dans un second temps en position initiale par une saccade rapide.

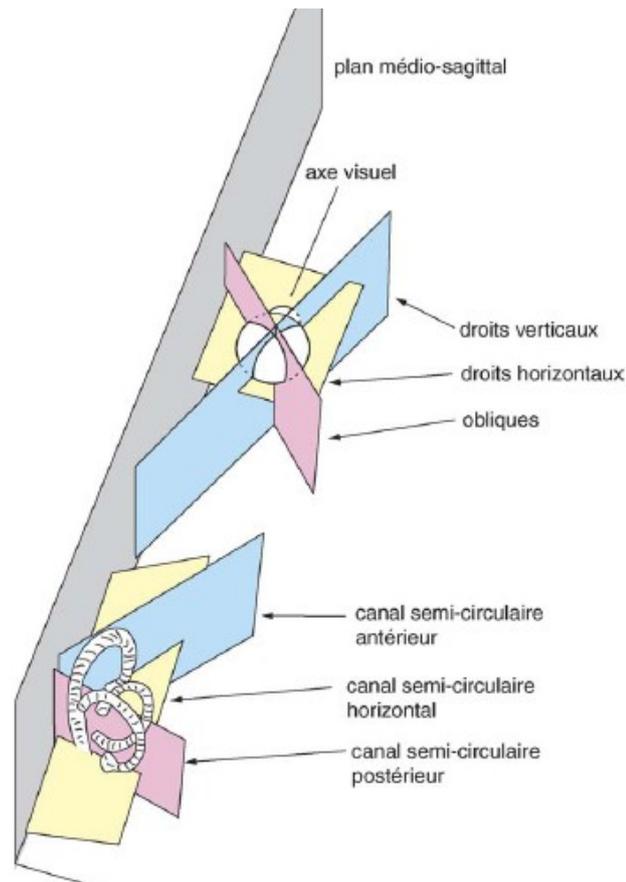


Figure 28 – Orientation tridimensionnelle des plans des canaux semi-circulaires et des directions de traction des muscles extra-oculaires chez l'homme, d'après (Graf et Klam 2006).

2.5.3. Conclusion

Le système vestibulaire, en tant que centrale inertielle du corps humain, est l'organe central pour le maintien de l'équilibre. De ce fait, il est à la source des mécanismes réflexes du maintien de la posture, mais aussi de la stabilisation du regard. Pour cette deuxième fonction, il existe de fortes interactions entre les canaux semi-circulaires et les yeux. Ces interactions se traduisent par des voies réflexes directes entre les canaux semi-circulaires et les muscles extra-oculaires, et par des aires du cerveau communes entre les deux systèmes.

2.6. Conclusions

Le mouvement n'est pas considéré comme un sens au même titre que la vue ou l'ouïe par exemple, car il ne dépend pas que d'un seul organe mais plutôt du recoupement de plusieurs modalités sensorielles. Berthoz parle *du* « sens du mouvement » (Berthoz 1995) : on pourrait également parler *des* sens du mouvement que sont la modalité visuelle, la modalité vestibulaire et la proprioception. Toutes ces modalités renvoient au cerveau des informations renseignant sur la position, la vitesse ou l'accélération du corps par rapport à lui-même et/ou son environnement. Le chapitre suivant expliquera comment le cerveau utilise ces informations pour les fusionner en une sensation de mouvement unique et cohérente. Cependant, les différents organes intervenant dans ces modalités sensorielles ne

sont pas juste de simples capteurs. De par leur fonctionnement, ils réalisent un premier traitement de l'information avant de la faire parvenir au système nerveux central.

L'œil permet d'obtenir une image de notre environnement. Toutefois nous avons vu qu'au sein de cet organe, il existait différents types de cellules photoréceptrices et différents types de cellules ganglionnaires, inégalement réparties sur la surface de la rétine. La vision centrale permet une vue en couleurs, où la distinction des formes est plus performante. La vision périphérique quant à elle procure une meilleure perception en faible luminosité et est plus adaptée à la détection du mouvement.

Nous avons vu également que le système vestibulaire joue le rôle de centrale inertielle du corps humain, les organes à otolithes étant sensibles aux accélérations linéaires et les canaux semi-circulaires aux accélérations angulaires. Cependant, l'information qu'ils renvoient est modifiée par rapport au stimulus de base. Les canaux semi-circulaires renvoient une information plus proche de la vitesse angulaire que de l'accélération angulaire. Les organes otolithiques renvoient une information relative à l'accélération linéaire, sur laquelle vient se greffer une composante liée au jerk, jouant ainsi le rôle de « sens alerteur ». Par ailleurs, les récepteurs liés aux modalités du toucher et de la proprioception viennent généralement renforcer ces informations vestibulaires.

Enfin, nous avons vu que les modalités visuelle et vestibulaire interagissent fortement, notamment pour les mécanismes réflexes de stabilisation du regard.

Chapitre 3 Perception du mouvement propre

Nous avons vu dans le précédent chapitre que la quasi-totalité des modalités sensorielles humaines (hormis le goût et l'odorat) peuvent jouer un rôle dans la perception du mouvement. Nous avons vu également les principes de fonctionnement des systèmes visuel, vestibulaire, somatosensoriel... ainsi que les types d'informations renvoyées par ces modalités sensorielles. Ce chapitre est consacré à étudier comment le système nerveux central extrait de ces signaux des informations sur le déplacement dans l'espace afin de créer la sensation de mouvement.

Nous verrons dans un premier temps que de nombreuses informations peuvent être issues du système visuel seul, notamment à travers le flux optique qui permet d'obtenir à la fois la direction du mouvement et sa vitesse. La perception de la vitesse étant liée à la perception des distances, nous détaillerons également comment l'être humain perçoit la profondeur. Dans une deuxième partie, nous verrons quelles sont les interactions multisensorielles qui existent et qui permettent au cerveau de faire émerger une sensation de mouvement unique et cohérente. Nous détaillerons plus particulièrement le concept de lavection et les théories existantes sur la perception d'un monde stable.

3.1. Perception visuelle du mouvement

La littérature concernant la perception visuelle du mouvement est très fournie car cette modalité visuelle est considérée comme principale pour la perception du mouvement. Le flux optique, notion apparue dans les années 1950, a été largement étudiée car elle permet d'obtenir des informations aussi bien sur la direction du mouvement que sur la vitesse. Après avoir défini les notions de flux optique et de flux rétinien, nous verrons comment ils peuvent être utilisés pour la perception de la vitesse, en relation avec les informations de profondeur.

3.1.1. Flux optique, flux rétinien

Définitions

L'image du monde qui se forme sur nos rétines est en constante évolution. En effet, dès que nous nous déplaçons dans notre environnement, dès que l'œil tourne dans son orbite ou dès qu'un objet se déplace par rapport à nous, l'image formée sur la rétine change. Or, à l'exception près des mouvements de saccade des yeux qui sont des rotations brutales survenant entre $10^\circ/s$ et $1000^\circ/s$, ce changement est continu et est donc descriptible à tout instant par la vitesse instantanée de déplacement d'un point lumineux constituant l'image. On appelle flux optique le champ de ces vecteurs vitesses lorsque l'œil est fixe par rapport à

la tête. La Figure 29 donne un exemple de représentation d'un flux optique radial correspondant à un mouvement vers l'avant.

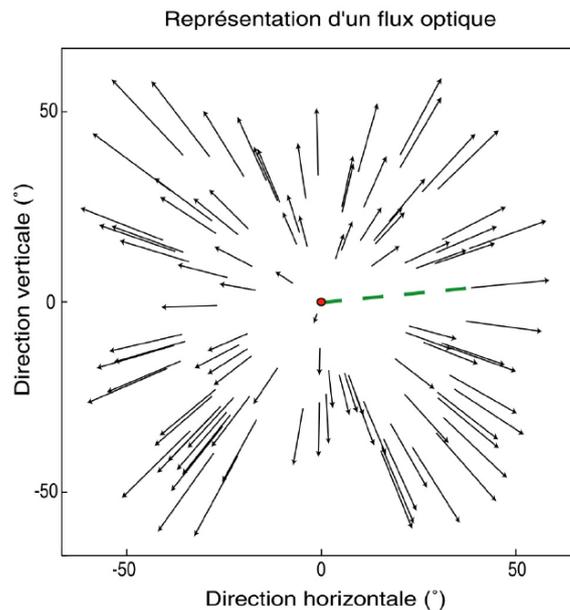
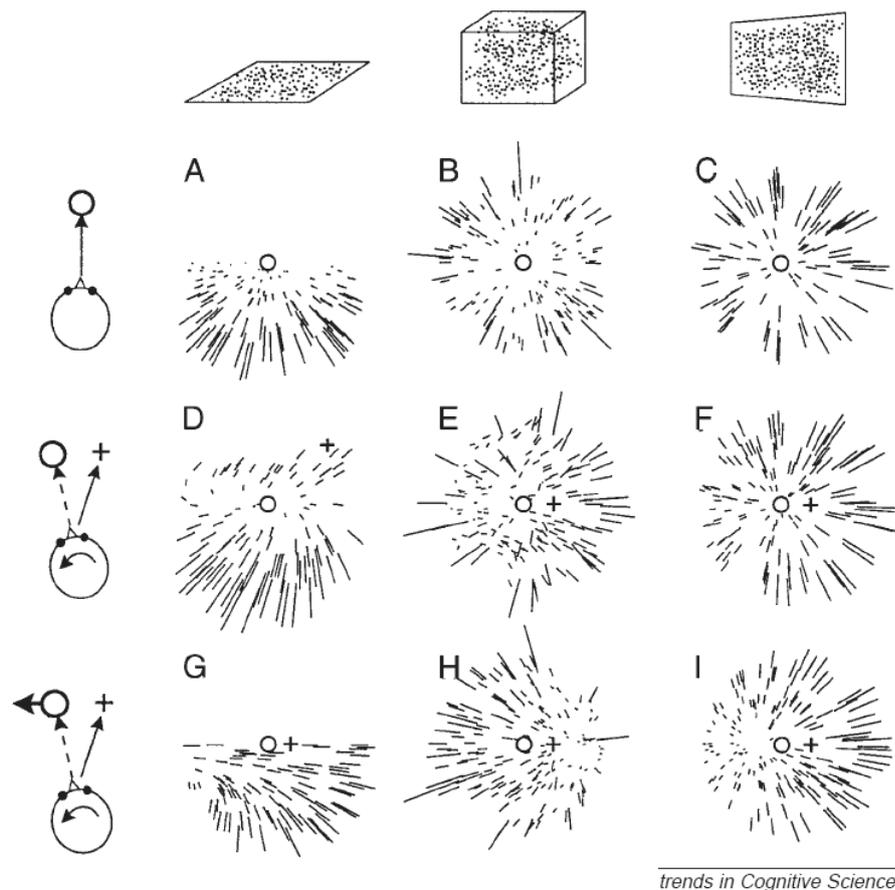


Figure 29 – Exemple de représentation d'un flux optique simulant un mouvement vers l'avant, d'après (Klam 2003).

Au centre (en rouge), le foyer d'expansion. Chaque vecteur de mouvement (lignes fléchées, en noir) est caractérisé par sa ligne de direction (ligne pointillée, en vert) le reliant au foyer d'expansion (en rouge au centre). Chacun de ces vecteurs représente le mouvement visuel provoqué par le déplacement d'un objet par rapport à l'observateur.

C'est Gibson (Gibson 1950) qui, le premier, remarque que le flux optique contient des informations pertinentes sur la locomotion. Sa structure dépend en effet du type de mouvement relatif entre l'observateur et l'environnement. Gibson montre alors que l'homme utilise le flux optique pour obtenir des informations comme la direction de son déplacement, sa vitesse propre ou encore le temps restant avant le contact avec un obstacle. Par exemple dans le cas simple d'un déplacement vers l'avant (flux radial Figure 29), les directions de tous les vecteurs de mouvement se croisent en un point remarquable appelé foyer d'expansion, que l'on interprète dans ce cas comme la direction du déplacement.

Ces indices de mouvement sont faciles à interpréter lorsque les yeux sont immobiles. Toutefois, cette situation reste très rare. Et le champ de vitesses formé sur la rétine devient alors la composition du champ de vitesses dû au mouvement de la tête relativement à l'environnement et du champ de vitesses induit par le mouvement de l'œil par rapport à la tête. Le champ alors obtenu est appelé flux rétinien, dont l'interprétation est beaucoup plus complexe que celle du flux optique. La Figure 30 donne des exemples de structures de flux rétinien.



trends in Cognitive Sciences

Figure 30 – Structures possibles de flux rétiniens, d'après (Lappe, Bremmer et van den Berg 1999).

Le flux rétinien perçu par un observateur en mouvement dépend de la direction du déplacement, la rotation de l'œil, et de la composition de l'environnement.

Les colonnes représentent différents environnements :

(A, D, G) un plan horizontal (« sol ») ;

(B, E, H) un volume de points aléatoires ;

(C, F, I) un plan vertical (« mur »).

Les lignes représentent différentes combinaisons de déplacement de l'observateur et de rotation de l'œil.

(A, B, C) Mouvement vers l'avant en l'absence de mouvement de l'œil.

(D, E, F) Mouvement vers l'avant (en direction de la croix) pendant que le regard (indiqué par un cercle) est dirigé vers un élément de l'environnement ;

(G, H, I) Mouvement vers l'avant (en direction de la croix) pendant que le regard suit une cible se déplaçant horizontalement (indiquée par un cercle). Cette cible n'est pas attachée à l'environnement, si bien que le mouvement de l'œil est découplé du mouvement de l'observateur. En G et I, le mouvement de l'œil s'effectue vers la gauche, en H vers la droite.

On peut observer dans la Figure 30 que l'interprétation du flux rétinien est en effet plus simple pour la première ligne car l'œil reste immobile par rapport à la tête. Les flux rétiniens A, B et C sont donc des flux optiques et on observe dans les 3 cas que le point singulier (foyer d'expansion) correspond à la direction du déplacement. Pour la deuxième ligne (D-F) et la troisième ligne (G-I), l'œil ne reste plus immobile pendant le mouvement. On s'aperçoit alors que lorsqu'un objet de l'environnement est fixé (D-F), le point singulier ne correspond plus à la direction du déplacement mais à la cible car c'est ce point qui est stabilisé sur la rétine. Si le point fixé n'est plus attaché à l'environnement (G-I), le point singulier peut même disparaître et le flux rétinien obtenu peut facilement être confondu avec celui d'une autre configuration. En G par exemple, le flux rétinien pourrait être facilement confondu avec celui perçu dans un virage.

Structure du flux optique

Pour mieux comprendre la structure du flux optique, et donc les informations qu'il est possible d'en retirer, nous allons voir qu'il est possible de le décomposer en « éléments simples ». Comme un mouvement dans l'espace peut se décomposer en un ensemble de translations et de rotations, on peut considérer le flux optique correspondant à ce mouvement comme la composition des flux optiques résultants des translations et rotations composant le mouvement (Longuet-Higgins et Prazdny 1980). De ce fait, en analysant les caractéristiques des flux optiques correspondant à une translation pure ou à une rotation pure, on peut alors déterminer les caractéristiques du mouvement global.

Dans le cas d'une rotation pure (Figure 31.a), l'image rétinienne tourne autour d'un point (R) correspondant à l'intersection de l'axe de rotation avec la rétine. La vitesse angulaire de cette rotation de l'image rétinienne correspond alors simplement à la vitesse de rotation du mouvement. Dans le cas particulier où l'axe de rotation est vertical, le mouvement sur la rétine est uniforme, c'est-à-dire que tous les points de l'image ont la même vitesse angulaire.

Dans le cas d'une translation pure (Figure 31.b), le flux optique possède une disposition radiale (comme dans la Figure 29) dont le pôle (Q) correspond à l'intersection de la direction de translation avec la rétine. Les vitesses des points de l'image rétinienne « fuient » ce pôle, qu'on appelle foyer d'expansion. De plus, la distribution des vitesses autour de ce foyer d'expansion va dépendre de la structure de l'environnement. De façon générale, plus un objet sera proche et plus sa vitesse sur l'image rétinienne sera importante. Et pour des objets situés à la même distance, plus leur excentricité par rapport à l'axe optique sera grande, et plus leur vitesse sur l'image rétinienne sera grande également.

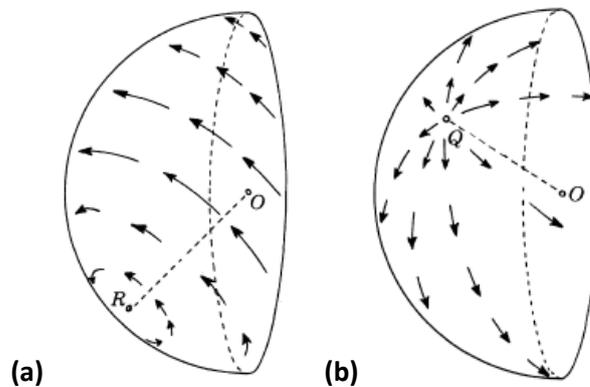


Figure 31 – Représentation du flux optique sur une rétine hémisphérique, d'après (Longuet-Higgins et Prazdny 1980).

O représente le centre optique de la rétine.

- (a) Flux optique dû à une rotation pure. R est l'intersection de l'axe de rotation avec la rétine.*
- (b) Flux d'expansion dû à une translation pure. Le foyer d'expansion Q est l'intersection de la direction de la translation avec la rétine.*

Enfin, les mouvements oculaires vont rajouter au flux rétinien une dernière composante qui est du même type que la composante correspondant à une rotation pure. Les mouvements oculaires sont en effet des mouvements de rotation de la rétine. Ainsi, le flux rétinien global correspondra à la composition des flux de rotation et de translation correspondants respectivement à la rotation et à la translation de la tête dans l'environnement, et d'un flux de rotation correspondant au mouvement oculaire. On notera

toutefois qu'on fait ici l'hypothèse que le monde est rigide, c'est-à-dire que les éléments de l'environnement ne se déplacent pas les uns par rapport aux autres.

3.1.2. Flux optique et vitesse perçue

Ambiguïtés du flux optique

Avant d'étudier la façon dont l'être humain traite le flux optique pour en tirer une information de vitesse, il convient de faire état des ambiguïtés qu'il présente. Tout d'abord, le flux optique ne permet pas de savoir si c'est le sujet qui se déplace dans l'environnement, ou si c'est l'environnement qui se déplace par rapport au sujet. On voit donc qu'il ne permet pas de répondre à la question pourtant simple : « Suis-je en mouvement ? ». Cette ambiguïté a souvent été mise en avant pour apporter une forme de validité aux simulateurs de conduite statiques.

Une autre ambiguïté du flux optique est celle concernant l'indétermination de la composante de la vitesse en profondeur. En effet, le flux optique est uniquement bidimensionnel car il est le résultat d'une projection sur une surface (la rétine). Ainsi, comme le montre la Figure 32, plusieurs vitesses peuvent avoir la même projection sur la rétine et ainsi être interprétées de la même manière.

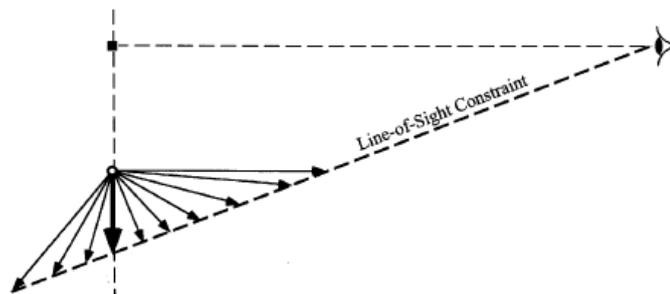


Figure 32 – Indétermination par le flux optique de la composante de mouvement en profondeur, d'après (Clifford, Beardsley et Vaina 1999).

Le point de l'espace représenté par un disque blanc a une vitesse représentée par la flèche en gras. Toutefois, l'observateur peut interpréter ce mouvement par n'importe quelle autre flèche dont l'extrémité est sur la droite appelée « contrainte de ligne de vue » (« Line-of-Sight Constraint »).

Enfin, le flux optique présente également une ambiguïté d'échelle. Comme le montre la Figure 33, les vitesses apparentes d'objets ayant des vitesses pourtant différentes peuvent être identiques. Tout comme l'indétermination de la composante en profondeur de la vitesse, l'ambiguïté d'échelle est due au fait que le flux optique est une projection en 2 dimensions d'un monde en 3 dimensions.

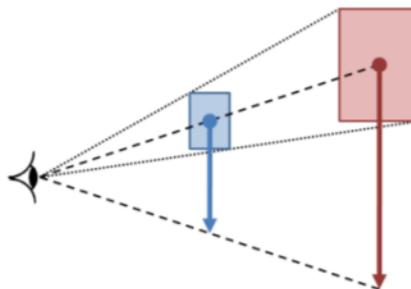


Figure 33 – Illustration de l'ambiguïté d'échelle du flux optique.

Le flux optique seul n'est pas suffisant pour distinguer les mouvements des 2 objets, pourtant de taille et de vitesses différentes.

On verra plus tard que d'autres indices visuels (notamment la parallaxe de mouvement) ainsi que le système vestibulaire sont à-même de lever les ambiguïtés du flux optique. De plus, (Gibson 1950) montre que le cerveau utilise des hypothèses fortes pour l'interprétation du flux optique, notamment celles de la rigidité et de la stabilité de l'environnement. En effet, en conditions écologiques (c'est-à-dire en conditions naturelles), l'environnement ne se déforme pas et c'est le sujet qui se déplace dans l'environnement, et non l'environnement qui se déplace par rapport au sujet. Ce sont donc prioritairement ces hypothèses qui sont utilisées en cas de doute.

Dans l'expérience de (Clifford, Beardsley et Vaina 1999) par exemple, les sujets sont soumis à un flux uniquement radial engendré par un plan face à l'observateur en translation vers l'observateur. De par les ambiguïtés du flux optique, le système visuel peut interpréter ce flux radial d'une infinité de manières, en jouant sur les combinaisons entre déplacement et dilatation du plan. A l'extrême, le plan peut être perçu comme fixe et se dilatant. A l'opposé, il peut être perçu comme rigide et se déplaçant vers le sujet. C'est cette deuxième interprétation qui a été le plus souvent effectuée par les sujets, montrant ainsi l'hypothèse faite a priori par le cerveau sur la rigidité de l'environnement.

Flux optique et vitesse en profondeur

Nous avons vu que flux optique présente plusieurs ambiguïtés, dont notamment une concernant la composante en profondeur de la vitesse d'un objet. Cependant, (Berthoz et Droulez 1982) montrent qu'avec certaines hypothèses sur la structure de l'environnement (notamment sa rigidité), il est possible d'extraire à partir d'un flux radial des informations sur la vitesse de l'observateur relativement à l'environnement. Ils considèrent l'exemple d'un flux radial généré par la translation à la vitesse V d'un observateur relativement à un environnement rigide (Figure 34). Si la projection sur la rétine d'un point situé à la profondeur D se situe à la distance ρ du foyer d'expansion, elle subit alors une dilatation $\dot{\rho}$ (dérivée temporelle de ρ) gouvernée par la loi $\frac{V}{D} \approx \frac{\dot{\rho}}{\rho}$.

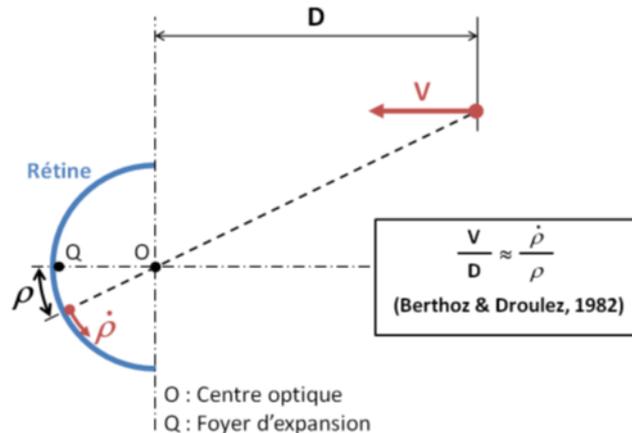


Figure 34 – Illustration de la loi proposée par (Berthoz et Droulez 1982) sur la perception de la vitesse à partir des données du flux optique.

Cette loi est indépendante de la position du point choisi. Le rapport $\frac{\dot{\rho}}{\rho}$ peut donc être considéré comme un invariant du flux optique. Lee (Lee 1976) avait par ailleurs été le premier à proposer que le conducteur puisse utiliser le « temps avant contact » (*TTC Time To Contact* ou *Time To Collision*) comme variable de régulation pour une tâche de freinage ou pour suivre un autre véhicule. Si on considère un point appartenant au véhicule précédant le

véhicule simulé ou plus simplement l'endroit auquel on veut stopper son véhicule, alors le « temps avant contact » n'est autre que $\frac{D}{v}$, en d'autres termes l'inverse du rapport $\frac{\dot{\rho}}{\rho}$ utilisé par (Berthoz et Droulez 1982).

On s'aperçoit donc qu'il est théoriquement possible d'extraire des informations de vitesse en profondeur à partir du flux optique. Cependant, il est pour cela nécessaire de résoudre les ambiguïtés qui lui sont inhérentes : deux éléments permettent d'interpréter correctement le flux optique. Premièrement, la préférence pour la perception d'un environnement rigide (hypothèse de constance de taille) permet de lever l'ambiguïté sur la composante de profondeur. Deuxièmement, la perception correcte de la profondeur de chaque point de l'environnement permet de déterminer la vitesse d'un point grâce à la relation donnée par (Berthoz et Droulez 1982). Comme nous le verrons par la suite, la vision binoculaire ainsi que la parallaxe de mouvement permettent de remplir cette deuxième condition sur la perception en profondeur.

Toutefois, on pourra remarquer que rien jusqu'à présent ne permet de lever l'ambiguïté d'échelle du flux optique. Et elle ne peut être résolue que par l'interaction avec d'autres indices fournissant l'échelle de l'environnement. Typiquement, en conditions réelles, ces indices peuvent être fournis par les systèmes vestibulaires et/ou proprioceptifs (Harris, Jenkin et Zikovitz 2000). D'autres travaux ont également montré qu'avec une simulation uniquement visuelle, l'humain est capable de discerner avec précision deux distances parcourues ((Bremmer et Lappe 1999), (Lappe, Jenkin et Harris 2007)). Or l'estimation de distance reposant sur une certaine intégration de la vitesse (Lappe, Jenkin et Harris 2007), l'humain est donc capable de calibrer l'information de vitesse qu'il perçoit en fonction de la taille supposée de l'environnement. L'ambiguïté d'échelle peut donc être a priori résolue uniquement avec des informations visuelles.

Hauteur du point de vue

Pour la même vitesse de déplacement dans le même environnement, il a été montré que la hauteur du point de vue fait varier le flux optique. La vitesse perçue est donc également impactée par ce paramètre (Larish et Flach 1990). Plus le point de vue est haut, plus l'intensité du flux optique diminue et donc plus la vitesse perçue sera faible. Pour quantifier ce phénomène, un indice : la « vitesse du flux optique global » (*GOFR*, *Global Optical Flow Rate*) est utilisé. Il correspond au rapport de la vitesse par la hauteur du point de vue.

Par exemple, un avion se déplaçant à 250 m/s à une altitude de 9000 m génèrera un *GOFR* de $0,028 \text{ s}^{-1}$. Un piéton se déplaçant à 0,8 m/s (environ 2,88 km/h) dont les yeux seraient à 1,6 m du sol génèrerait un *GOFR* de $0,5 \text{ s}^{-1}$, et aurait donc une sensation de vitesse plus importante que le pilote de l'avion de l'exemple précédent.

Dans le cadre de la simulation de conduite, une étude de (Panerai, et al. 2001) menée avec des conducteurs de poids lourds, montre un effet significatif de la hauteur du point de vue. Plus le point de vue est haut et plus les conducteurs roulent vite, tout en réduisant les distances de sécurité. La hauteur du point de vue a donc également une influence sur la perception des distances, comme nous le verrons par la suite.

« Vitesse de bord » (*Edge Rate*)

En conduisant, il est facilement remarquable que l'environnement lui-même peut également avoir une influence sur la perception de la vitesse. Par exemple, il n'est pas rare d'avoir une sensation de vitesse qui augmente lorsqu'on roule sur une route bordée d'arbres après avoir traversé une zone de rase campagne.

La « vitesse de bord » (*ER, Edge Rate*) a été définie par (Denton 1980) comme le nombre d'éléments texturés croisant un point de référence dans le champ visuel de l'observateur (comme par exemple le bord du pare-brise), par unité de temps. Son étude consistait à faire conduire les sujets sur une route possédant des marquages au sol de type « bandes transversales ». En faisant diminuer de façon exponentielle la distance séparant les bandes, Denton a mesuré une réduction significative de la vitesse.

Influences de la luminosité et du contraste

Enfin, la luminosité et le contraste ont également une influence sur le flux optique ((Snowden, Stimpson et Ruddle 1998), (Blakemore et Snowden 1999)), entraînant donc un changement de vitesse perçue. Dans leur étude, (Snowden, Stimpson et Ruddle 1998) soutiennent qu'en cas de brouillard (qu'ils simulent par une baisse de contraste), la vitesse perçue est plus faible, ce qui explique pourquoi les automobilistes rouleraient plus vite, malgré le danger plus important dû au manque de visibilité. Plus récemment, (Pretto, Vidal et Chatziastros 2008) remettent en cause cette explication. Ils soutiennent que la diminution de vitesse perçue en cas de brouillard ne proviendrait pas de la baisse de contraste, mais du fait que le brouillard réduit la visibilité de façon plus forte pour les éléments éloignés (dans la vision centrale) que pour les éléments proches (dans la vision périphérique).

3.1.3. Perception des distances

Nous avons vu qu'une des conditions nécessaires à l'estimation de la vitesse est la bonne perception des distances. La perception de la vitesse et la perception des distances sont donc deux notions liées. Nous allons voir que l'être humain possède plusieurs moyens de percevoir la profondeur et les distances égocentriques (Paillé 2005). Ces informations de profondeur peuvent se classer en 3 catégories : informations monoculaires, informations binoculaires et informations apportées par le mouvement (notamment la parallaxe de mouvement).

Informations monoculaires

Les informations monoculaires peuvent permettre d'avoir une rapide estimation de la profondeur d'un objet. Par exemple, lorsqu'un objet plus proche cache complètement ou en partie un objet plus éloigné, on parle alors d'occlusion. Ce phénomène ne permet pas d'obtenir une information de profondeur absolue, mais plutôt une information qualitative sur la profondeur relative des objets constituant la scène.

Les effets de perspectives (perspective géométrique, perspective linéaire, perspective aérienne, perspective/gradient de texture...) sont également des indices monoculaires permettant d'apprécier la profondeur. Ces effets sont associés au phénomène de constance de taille et de taille relative qui font que plus un objet est loin, plus sa taille

apparente est petite. L'effet du phénomène de constance de taille est par ailleurs d'autant plus marqué lorsque l'objet est connu.

Enfin, la hauteur du point de vue joue également un rôle important dans la perception de la profondeur. C'est Gibson (Gibson 1950) qui le premier rappelle que pour des objets situés sur un plan horizontal, plus leur distance est faible et plus ils sont perçus bas par rapport à l'horizon. Dans leur expérimentation, (Ooi, Wu et He 2001) montrent que le système visuel utilise la déclinaison angulaire par rapport à l'horizon (Figure 35) pour les jugements de distance : lorsqu'ils utilisent des prismes biaisant cette déclinaison angulaire, les sujets sous-estiment la distance.

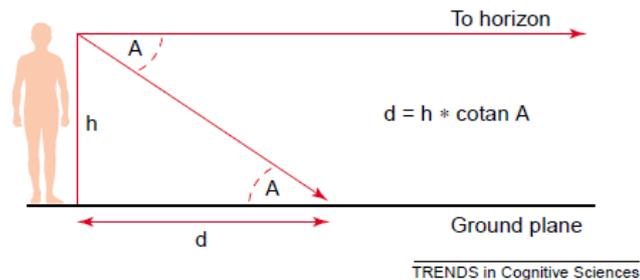


Figure 35 – Illustration de la déclinaison angulaire, d'après (Kemeny et Panerai 2003).

Le système visuel peut calculer la distance absolue (d) à un objet placé sur le sol, à partir de la hauteur des yeux (h) et la déclinaison angulaire par rapport à l'horizon (A). Mathématiquement, la distance est donnée par le produit de (h) par la cotangente de (A).

Les informations monoculaires sont souvent restituées en simulation de conduite et de façon plus générale en réalité virtuelle. Paillé (Paillé 2005) montre cependant qu'une limitation du champ de vision entraîne une sous-estimation de la perception des distances égocentriques. Cette sous-estimation est toutefois résorbée lorsque les mouvements de tête sont autorisés.

Informations binoculaires

En plus des informations monoculaires, l'être humain utilise des informations binoculaires pour la perception de la profondeur. L'accommodation en est une. Elle correspond à la « mise au point » de l'œil pour obtenir une image nette sur la rétine. Cette « mise au point » est obtenue par une déformation du cristallin, qui devra être plus ou moins importante en fonction de la distance de l'objet fixé. De plus, l'accommodation est faite de façon couplée entre les deux yeux. C'est pourquoi elle est généralement classée dans les informations binoculaires.

L'accommodation est accompagnée d'un mouvement de rotation des yeux qu'on appelle vergence, générant lui aussi des informations proprioceptives relatives à la distance de l'objet fixé. Ce mouvement de vergence des yeux permet que l'image de l'objet observé se projette sur les fovéas des deux yeux. Ainsi, plus l'objet fixé sera proche et plus la vergence des yeux sera importante.

Enfin, la disparité binoculaire (ou parallaxe binoculaire) est un des indices binoculaires les plus importants pour la perception de distances moyennes (inférieures à 20m (Cutting et Vishton 1995)). Elle correspond à la différence qui existe entre les images formées sur les rétines des deux yeux. Il est théoriquement possible de percevoir la profondeur uniquement avec cette information : on parle alors de stéréopsie. Cependant, son efficacité diminue avec la distance. En effet, plus un objet est éloigné et plus les axes de

vision deviennent parallèles et il n'y a alors plus de disparité. Toutefois en environnement virtuel, la construction des images stéréoscopiques se base essentiellement sur les indices de parallaxe binoculaire.

Parallaxe de mouvement

Les informations apportées par le mouvement constituent la dernière catégorie d'indices permettant à un sujet d'apprécier la profondeur. Nous avons déjà évoqué les informations amenées par le flux optique lors du déplacement longitudinal ou lors d'une rotation du sujet dans son environnement. Toutefois, lorsqu'un observateur effectue des mouvements de tête latéraux (vers la gauche ou la droite), il perçoit également des indices de parallaxe de mouvement. Ces indices contribuent à la perception de la structure tridimensionnelle de l'environnement (Figure 36).

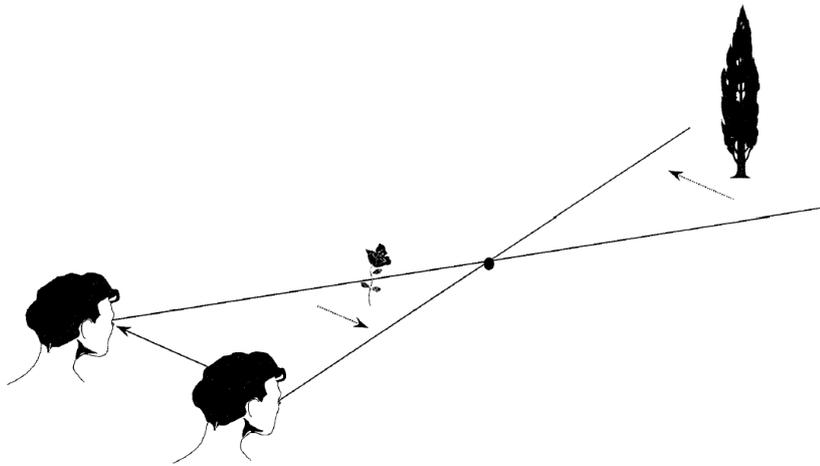


Figure 36 – Illustration du phénomène de parallaxe de mouvement, d'après (Guerraz, et al. 2001).

Lorsque le sujet se déplace latéralement dans une scène stationnaire tout en fixant un point de l'espace, les objets situés en avant de ce point se déplacent par rapport au sujet dans la direction opposée à son déplacement, et les objets situés en arrière se déplacent dans la même direction. L'amplitude de ce déplacement relatif dépend en particulier de l'éloignement des objets par rapport au point de fixation. Ce phénomène, appelé parallaxe de mouvement, constitue un indice important dans la perception des profondeurs et des distances.

Les mouvements de tête de l'observateur entraînent un déplacement relatif apparent des objets constituant l'environnement, qui est fonction de leur distance relative au point de fixation du regard. Plus un objet sera éloigné de ce point de fixation et plus son déplacement apparent sera ample. De plus, ce déplacement apparaîtra dans le sens opposé au mouvement de l'observateur si l'objet correspondant est situé en avant du point de fixation et dans le même sens si l'objet est situé en arrière de ce point.

La parallaxe de mouvement est ainsi un indice fort pour la perception des profondeurs relatives des différents éléments de l'environnement. Des études de (Rogers et Graham 1979) et de (Ono, Rivest et Ono 1986) ont également montré que si les informations de parallaxe de mouvement étaient couplées aux informations sensorielles de mouvement propre et de distance du point de fixation, elles pouvaient alors constituer un indice de perception de profondeur absolu.

Les informations procurées par la parallaxe de mouvement sont utilisées par le cerveau pour reconstruire la forme des objets observés et la structure tridimensionnelle d'une scène visuelle. On appelle ce phénomène le *structure from motion* (Longuet-Higgins et Prazdny 1980). Cependant, comme pour le flux optique cette information n'est pas

suffisante. Elle nécessite encore une fois de faire des hypothèses supplémentaires sur la rigidité de l'environnement.

Une étude de (Wexler, et al. 2001) montre que le système visuel utiliserait plutôt une hypothèse de stationnarité des objets de l'environnement lorsque le flux optique de parallaxe est généré par le mouvement de l'observateur. Dans son expérience les sujets passifs et actifs, même en voyant le même stimulus visuel, perçoivent la structure tridimensionnelle de façon différente. Cela tend à montrer la dépendance de cette perception à des signaux extrarétiniens.

3.2. Interactions multisensorielles pour la perception du mouvement propre

3.2.1. La vection

La vection, une illusion sensorielle ?

La vection est un puissant phénomène d'induction d'un mouvement propre par une stimulation visuelle. L'illusion du train est l'exemple le plus connu et le plus représentatif de ce phénomène. Il s'agit du cas où nous nous trouvons arrêtés dans un train à quai et que le train voisin démarre : nous pouvons alors avoir l'impression que c'est notre train qui est en mouvement. Il est souvent considéré que la vection est une illusion perceptive, car un mouvement propre est perçu alors que le sujet est objectivement immobile. La vection serait alors une erreur de perception commise par le cerveau. Toutefois, ce point ne fait pas l'unanimité.

Gibson a été le premier à remettre en cause le côté illusoire de la vection. Dans son approche écologique de la perception visuelle (Gibson 1979), il explique qu'un observateur mesurant par sa rétine un mouvement de l'environnement relativement à soi se perçoit nécessairement en mouvement, car en conditions écologiques (c'est-à-dire naturelles) l'environnement est toujours stationnaire. L'illusion produite sur un simulateur de vol ou de conduite n'est donc jamais une illusion en situation écologique.

De plus, selon (Dichgans et Brandt 1978), les noyaux vestibulaires sont également activés pendant la vection (voir 2.5.1), suivant la même évolution temporelle que la sensation de mouvement propre. Comme nous avons également vu qu'en vitesse établie le signal renvoyé par le système vestibulaire s'éteint (voir 2.3), ce constat sur l'activation des noyaux vestibulaires a amené l'hypothèse que la vection joue un rôle complémentaire à l'information vestibulaire. Comme nous le verrons par la suite, la vection n'apparaît pas de façon instantanée : le temps de latence de son apparition vient alors renforcer cette hypothèse de complémentarité fréquentielle entre la vision et le système vestibulaire.

Etablissement de la vection

La vection n'est pas un phénomène instantané : elle apparaît avec une latence pouvant varier de 1 à 10 secondes. Puis elle devient exclusive au bout de 5 à 15 secondes : on parle alors de vection saturée. (Dichgans et Brandt 1978) rapportent même que la vection peut durer jusqu'à 30 secondes après la disparition du stimulus par extinction de la lumière. Ces valeurs ont été obtenues en vection circulaire (mouvement de rotation) en utilisant notamment des cylindres texturés en rotation autour du sujet. Néanmoins, (Berthoz, Pavard et Young 1975) trouvent des résultats similaires en vection linéaire (mouvement de translation). La Figure 37 donne plusieurs exemples d'appareils pour l'étude des vections linéaires et circulaires.

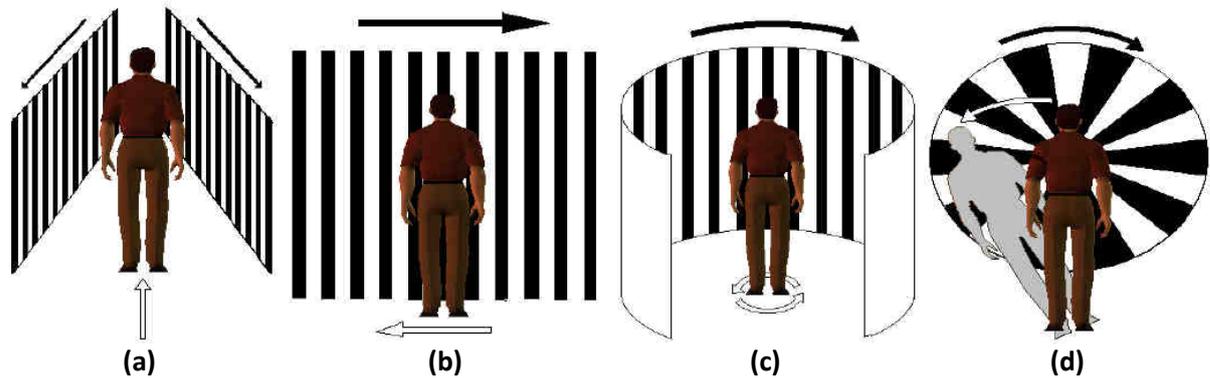


Figure 37 – Exemples d'appareils pour l'étude des vections linéaires (a et b) et circulaires (c et d), d'après (Neimer 2002).

Ces vections sont induites par des flux visuels en translation longitudinale (a) et latérale (b), ainsi qu'en rotation en lacet (c) et en roulis (d). La flèche pleine indique la direction des mouvements réels de la scène visuelle et la flèche évidée la sensation de mouvement du sujet. Dans chaque cas, le sujet reste immobile.

En 1978, (Borah, Young et Curry 1978) résument les principales caractéristiques de la vection :

- L'établissement de la vection est dominé par la vision périphérique. Nous reviendrons sur ce point par la suite.
- La présence d'un objet stationnaire situé à l'avant du stimulus n'affecte pas la vection et peut même la renforcer. A l'inverse, si l'objet stationnaire est situé en arrière-plan du mouvement visuel, la vection peut être annihilée.
- La latence du phénomène de vection dépend aussi bien du contexte que de l'individu.
- La sensation de mouvement propre induite par la vection se rapproche de celle induite par une stimulation vestibulaire à la différence qu'aucune accélération n'est perçue lors d'un changement de vitesse.
- La vection est fortement influencée par la présence d'informations vestibulaires.

Concernant ce dernier point, il a été montré que lorsque la stimulation vestibulaire est cohérente avec le mouvement visuel, le temps de latence de la vection ainsi que le temps d'établissement de la vection saturée sont réduits. Ces résultats ont été obtenus aussi bien en vection circulaire (Groen, Howard et Cheung 1999) qu'en vection linéaire (Berthoz, Pavard et Young 1975). Ils montrent ainsi l'importance de la restitution inertielle en simulation de conduite. En revanche, lorsque la stimulation vestibulaire est en conflit avec le mouvement visuel, la vection circulaire ne semble peu ou pas affectée (Groen, Howard et Cheung 1999) alors que la détection et l'identification de la direction du mouvement semblent fortement dégradés en vection linéaire (Berthoz, Pavard et Young 1975). Par ailleurs, des études ((Pavard et Berthoz 1977), (N. Filliard 2009)) montrent que la présentation d'une stimulation vestibulaire peut entraîner l'illusion d'un ralentissement (voir même d'un arrêt) du flux visuel.

La sensation de mouvement propre résulte donc de l'interaction entre un stimulus visuel et un stimulus inertiel. De plus, elle présente des caractéristiques optimales lorsque ces deux stimuli sont en accord. Un conflit résulte soit en une dégradation de la vection, soit en un choix d'une modalité dominante. Nous verrons par la suite que les conflits peuvent également provoquer l'apparition du mal du simulateur.

Concernant l'établissement de la vection, des études récentes ((Palmisano et Chan 2004), (Wright, DiZio et Lackner 2006)) montrent l'influence de facteurs cognitifs. Dans ces études, les résultats indiquent qu'une connaissance a priori de la possibilité d'un déplacement physique cohérent avec le mouvement visuel améliore la crédibilité du mouvement, mais n'a cependant aucun effet sur la latence de la vection. Dans le même ordre d'idées, (Riecke, et al. 2006) montrent que l'utilisation d'un environnement photo-réaliste favorise la diminution de la latence.

Influences de la vision centrale et de la vision périphérique

De nombreuses études ont été menées sur les influences de la vision centrale et de la vision périphérique sur la vection. Plusieurs théories émanent de ces études, que (Bardy, Warren et Kay 1999) proposent de classer en 3 catégories : hypothèse de dominance périphérique, hypothèse de sensibilité fonctionnelle et hypothèse d'invariance rétinienne.

La première hypothèse, l'hypothèse de dominance périphérique, est celle de (Dichgans et Brandt 1978), qui postule simplement que les stimulations en vision périphérique seraient prépondérantes dans la perception du mouvement de soi, par opposition aux informations visuelles centrales impliquées majoritairement dans la perception du mouvement d'objet. Cette hypothèse est la plus répandue de nos jours, et trouve également des fondements dans l'étude anatomique de l'œil (voir 2.2).

La deuxième hypothèse, défendue par (Warren et Kurtz 1992) postule que l'influence des visions centrale et périphérique sur le mouvement de soi dépende en fait de leur sensibilité fonctionnelle, à savoir que la rétine périphérique serait plutôt sensible au flux lamellaire alors que la vision centrale serait préférentiellement sensible au flux radial.

Enfin, la troisième hypothèse va à l'encontre des deux premières en postulant quant à elle que la vision centrale et la vision périphérique ont un rôle équivalent dans la perception du mouvement. Par exemple, (Crowell et Banks 1993) montrent à l'aide de flux radiaux et lamellaires présentés à différentes excentricités, que les visions centrales et périphériques ont la même sensibilité à la perception du mouvement. (Post 1988) montre quant à lui que pour de la vection circulaire, l'excentricité n'a pas d'influence sur la vection tant que la surface du stimulus reste constante. (Tarita-Nistor, et al. 2006) trouvent des résultats similaires pour de la vection linéaire, mais seulement si un point de fixation est rajouté sur le stimulus. En l'absence de ce point de fixation, la vision périphérique a, selon les auteurs, plus d'effet que la vision centrale pour induire le phénomène de vection.

Au vu de ces différentes hypothèses sur les influences respectives de la vision centrale et de la vision périphérique sur la vection, il semble peu évident de conclure. De plus, le manque de consensus aussi bien au niveau de la définition même de ces champs de vision en termes d'amplitude, qu'au niveau des paradigmes expérimentaux utilisés ne permet pas de comparer facilement les différents résultats expérimentaux. Toutefois, on pourra retenir qu'une stimulation de la vision centrale sous certaines conditions peut engendrer le phénomène de vection et que la stimulation de la vision périphérique semblerait favoriser l'émergence de la sensation de mouvement propre.

3.2.2. Distinction entre mouvement propre et mouvement d'objets

Nous avons évoqué précédemment le fait que l'œil ne serait pas capable à lui seul de faire la distinction entre le déplacement dans un environnement stable et le déplacement de tout l'environnement par rapport à lui. L'œil ne véhicule en effet qu'une information de déplacement relatif. Pourtant, comme nous venons de le voir avec la vection, cette distinction est faite et le cerveau parvient à faire émerger la sensation d'un environnement stable pendant le mouvement propre. Comment y parvient-il ? La littérature propose plusieurs théories pour répondre à cette question centrale pour la simulation de conduite.

Théorie de la perception directe

Selon cette approche théorique, proposée initialement par Gibson ((Gibson 1966), (Gibson 1979)), la séparation des composantes de mouvement propre et du mouvement des objets dans le flux rétinien peut être réalisée à partir des seules informations que ce flux contient. C'est l'hypothèse dominante sur laquelle se fondent la majorité des études sur la perception visuelle du mouvement que nous avons vues dans la partie précédente.

La théorie de la perception directe fait partie de la théorie écologique de la perception que nous avons déjà évoquée précédemment, qui explique la perception dans les conditions les plus naturelles possibles. En particulier, une hypothèse forte de la théorie écologique est la stationnarité de l'environnement. Le monde environnant ne peut donc jamais, par hypothèse, être perçu comme étant en mouvement.

Selon cette théorie, le flux optique suffit pour percevoir le mouvement. Des développements mathématiques ont montré qu'il était en effet possible de construire un algorithme analysant le flux optique afin d'en déduire le mouvement propre ou le mouvement des objets, en ajoutant quelques hypothèses simplificatrices (Longuet-Higgins et Prazdny 1980). Les informations vestibulaires et les informations proprioceptives des mouvements oculaires ne sont pas utilisées dans cette théorie. Cet aspect multi-sensoriel n'a toutefois pas été le plus investigué, les recherches qui ont suivi se focalisant principalement sur l'analyse du flux optique.

On notera que cette théorie confère une certaine forme de validité aux simulateurs de conduite statiques (voir Chapitre 4), les conducteurs étant effectivement parfaitement capables de piloter leur véhicule virtuel uniquement à partir des indices visuels du mouvement.

Théories inférentielles

Il existe en fait deux théories inférentielles : la théorie afférente et la théorie efférente. Cependant, toutes deux se basent sur le postulat que l'information visuelle n'est pas suffisante à elle seule pour résoudre les questions liées à la perception du mouvement. Le cerveau utiliserait donc toutes les informations disponibles pour les utiliser dans un processus semblable à un raisonnement permettant de construire la sensation de mouvement correspondant le plus vraisemblablement à la réalité physique.

Dans la théorie afférente, le cerveau utilise, en plus des informations rétiniennes, les informations proprioceptives des muscles oculaires. Ces dernières correspondent à l'étirement des muscles et permettent donc en théorie de connaître la position de l'œil dans son orbite. Cependant, le décalage temporel des informations proprioceptives par rapport

aux informations rétinienne font qu'elles sont souvent considérées comme inefficaces. Il faut en effet attendre que les commandes motrices des mouvements oculaires parviennent aux muscles, que le mouvement soit effectué, que ce mouvement soit mesuré par les capteurs proprioceptifs qui finalement renvoient l'information au cerveau.

Cependant les résultats expérimentaux supportent mieux la théorie efférente, dans laquelle l'information sur le mouvement des yeux n'est pas extraite des informations proprioceptives des muscles oculaires, mais de la copie des commandes motrices (ou copie d'efférence) de ces muscles (von Holst et Mittelstaedt 1950). Ce signal permet alors de différencier facilement les composantes du flux rétinien dues au mouvement de l'œil de celles dues aux mouvements de l'environnement. Une expérience simple est classiquement citée afin de prouver l'existence d'un tel signal. En fermant un œil et en appuyant doucement sur le blanc de l'autre œil, le monde paraît soudainement instable, car le mouvement de translation de l'œil (sur lequel on appuie) n'est pas un mouvement volontaire.

Théorie du signal de référence

Bien que la théorie de la perception directe et les théories inférentielles soient en conflit, notamment sur la manière dont le cerveau fait émerger la sensation de mouvement des différentes informations sensorielles, on trouve pourtant des résultats expérimentaux supportant chacune de ces théories. Un consensus est en général trouvé en considérant que toutes les informations sensorielles sont utilisées, mais différemment suivant le contexte. La théorie du signal de référence (Wertheim 1994) est une théorie permettant d'unifier les théories de la perception directe et inférentielles.

La Figure 38 donne le modèle fonctionnel de la théorie du signal de référence. Les flèches noires épaisses correspondent au processus proposé par la théorie inférentielle expliquant la perception du mouvement des objets. Les flèches plus fines correspondent aux interactions visio-vestibulaires (vection, fusion visio-vestibulaire) typiques considérées par les modèles de perception du mouvement propre. Enfin, les flèches grises sont spécifiques au modèle proposé par Wertheim, qui tente ainsi de connecter ces deux aspects de la perception du mouvement, le plus souvent étudiés séparément.

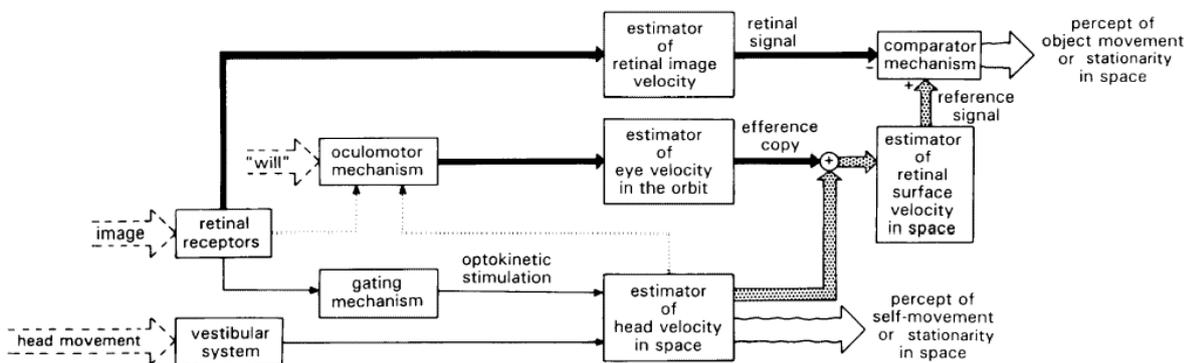


Figure 38 – Modèle fonctionnel décrivant la construction du signal de référence et des percepts de mouvement propre et de mouvements d'objet dans l'espace, d'après (Wertheim 1994).

3.2.3. Conflits sensoriels et mal du simulateur

En simulation de conduite, les conflits sensoriels (entre par exemple le mouvement visuel et la stimulation vestibulaire) sont nombreux. On peut même les considérer comme inévitables car un simulateur n'a pas la possibilité physique de déplacer le conducteur de la même façon que le ferait un véhicule en conditions réelles. Ces conflits sensoriels peuvent provoquer dans certains cas le mal du simulateur, qui est un cas particulier de cinétose.

Les cinétoses sont définies par un ensemble de réactions physiologiques se présentant sous la forme de symptômes cliniques (maux de têtes, nausées, pâleur etc.) largement ressentie dans la population générale soumise à des mouvements, physiques ou virtuels (Reason et Brand 1975). Il existe plusieurs variantes de cinétoses, comme le mal de mer, de l'air ou en voiture. Le mal du simulateur est une de ces variantes, résultant d'une exposition à un mouvement virtuel.

Les symptômes du mal du simulateur recourent en partie ceux identifiés dans le mal des transports classiques. (Kennedy, et al. 1993) ont développé le questionnaire *SSQ (Simulator Sickness Questionnaire)* largement utilisé dans les études relatives au mal du simulateur. Ce questionnaire liste exactement 16 symptômes : malaise général, fatigue, mal de tête, fatigue oculaire, difficulté d'accommodation, hyper salivation, suee, nausée, difficulté de concentration, sensation de tête lourde, vision floue, étourdissement yeux ouverts, étourdissement yeux fermés, vertige, réveil de la zone gastrique et vomissement.

Théorie explicative du mal du simulateur

La théorie explicative du mal du simulateur la plus souvent rencontrée est celle du conflit sensoriel (Reason et Brand 1975). Selon cette théorie, la cause du mal du simulateur serait le conflit perceptif dû aux différences entre les informations fournies par les systèmes sensoriels relatifs à la perception du mouvement. Le mal du simulateur serait donc le résultat d'un conflit que le cerveau ne peut pas résoudre.

Les conflits sont généralement classés en 2 catégories : les conflits intermodaux (entre le système visuel et le système vestibulaire par exemple) et les conflits intra-modaux (entre les canaux semi-circulaires et les organes otolithiques du système vestibulaire par exemple). Ces catégories se décomposent elles-mêmes en 2 types de conflits : soit les deux signaux sont présents et fournissent des informations contradictoires, soit un des deux signaux est absent. Dans ce deuxième cas, c'est principalement l'attente d'un signal qui provoque le conflit et donc la cinétose.

Cette théorie des attentes a une forte valeur explicative et peut rendre compte du lien étroit qui existe entre mal du transport et mal du simulateur. Ainsi dans le cas d'un simulateur de conduite statique par exemple (voir Chapitre 4), les informations de mouvement fournies par le système visuel entreraient en conflit avec l'absence d'informations vestibulaires concordantes, puisque le conducteur ne bouge pas réellement. Or compte-tenu du fait qu'en conduite réelle, le conducteur a accès conjointement à ces deux sources d'informations, il s'attend naturellement à cette perception, dès lors qu'il s'assoit derrière un volant pour conduire. Et c'est cette différence entre ce qui est attendu et ce qui est perçu qui créerait le conflit contribuant à induire le mal du simulateur.

Ce modèle des attentes a évolué, comme par exemple avec les modèles de (Oman 1990) et de (Droulez et Darlot 1989), afin de prendre en compte la spécificité des différents

capteurs sensoriels. D'autres études plus récentes, comme celle de (Groen et Bos 2008), cherchent à déterminer l'influence de la fréquence du conflit, afin notamment de pouvoir prédire de façon plus certaine l'apparition du mal du simulateur.

3.3. Conclusion

La perception du mouvement est un phénomène complexe qui émane de plusieurs modalités sensorielles (modalités visuelle, vestibulaire et proprioceptive entre autres) dont les signaux renvoyés ont été étudiés au Chapitre 2. La modalité visuelle semble au premier abord être celle fournissant le plus d'informations, aussi bien sur la perception de la direction du mouvement que sur la perception de la vitesse de déplacement ou encore sur la perception de la profondeur.

Le flux optique, correspondant au changement de l'image rétinienne au cours du temps, semble notamment être une information permettant de déterminer la direction du déplacement ainsi que sa vitesse. Certains auteurs, suivant la théorie de la perception directe (ou théorie écologique de la perception) proposée par Gibson (Gibson 1979) soutiennent même que le flux visuel peut suffire pour percevoir à la fois son déplacement dans l'environnement et le déplacement d'objets dans ce même environnement.

Un mouvement visuel peut en effet provoquer à lui seul une sensation de mouvement propre : on appelle ce phénomène la vection. Cependant, des études montrent que la vection n'émanerait pas de la seule modalité visuelle, mais plutôt d'une interaction multisensorielle, notamment entre les modalités visuelle et vestibulaire. La vection viendrait alors compenser les déficiences du système vestibulaire, ce dernier étant inefficace à vitesse constante.

Cet aspect multisensoriel de la perception du mouvement n'est pas pris en compte dans la théorie de la perception directe. Les ambiguïtés du flux optique, notamment concernant la perception des profondeurs et la stabilité de l'environnement, seraient résolues par le cerveau grâce à des hypothèses simplificatrices. D'autres théories, comme les théories inférentielles ou la théorie du signal de référence, présentent une approche multisensorielle prenant en compte les informations provenant de tous les capteurs de mouvement du corps.

Chapitre 4 Restitution du mouvement en simulation de conduite

Nous avons vu dans les chapitres précédents comment l'homme perçoit le mouvement, de la description des organes aux processus mentaux desquels émerge la sensation de mouvement. Ce chapitre traite des simulateurs de conduite et des techniques qu'ils emploient pour la restitution du mouvement. Nous commencerons par une description historique de la simulation de conduite. Nous verrons ensuite comment chaque modalité sensorielle utile à la perception du mouvement est stimulée. Enfin, nous finirons par une présentation des architectures logicielles employées pour le pilotage des simulateurs.

4.1. Les simulateurs de conduite

Historiquement, les premiers simulateurs ont vu le jour au début du XX^{ème} siècle. Il s'agissait de simulateurs de vol très rudimentaires, consistant par exemple à accrocher un avion à un câble. Leur objectif premier était de pouvoir apprendre à piloter à de jeunes pilotes pour la guerre. Les premiers simulateurs de conduite automobile ne sont apparus qu'une cinquantaine d'années plus tard.

En raison d'un manque de moyens techniques, aucun visuel n'était alors simulé sur les premiers simulateurs de vol, et les premières évolutions qui ont été apportées furent sur la restitution inertielle, c'est-à-dire sur la restitution des accélérations de l'avion et la simulation de la variation d'inclinaison de la gravité par rapport à l'avion. Pour ce faire, des systèmes automatisés à 2, 3, 4, 5, puis 6 degrés de liberté (avec la plate-forme de Gough-Stewart) ont vu le jour. Ce n'est que plus tard, avec l'avènement de l'informatique et de l'informatique graphique, qu'un visuel a pu être simulé.

4.1.1. Simuler le vol versus simuler la conduite

Lorsque la simulation de conduite automobile a commencé à voir le jour, elle a pu bénéficier des avancées de la simulation de vol, dont la technologie commençait à être plus mature. Cependant, la simulation de vol et la simulation de conduite diffèrent sur plusieurs points.

- En conduite automobile le visuel joue un rôle bien plus important qu'en vol. Alors qu'il est possible de piloter un avion avec un visuel très pauvre, en s'aidant principalement des instruments de bord, il semble au contraire être impossible de conduire une voiture sans voir la route. (Gibson et Crooks 1938) décrivent la

conduite comme une tâche à prédominance visuelle. De ce fait, les premières améliorations apportées aux simulateurs de conduite ont porté sur la restitution visuelle, avec les premiers pas de l'informatique graphique.

- Le contact avec la route implique une dynamique de mouvement des véhicules très différente de celle des avions. Les accélérations des voitures sont plus rapides (hautes fréquences) et plus importantes par rapport à celles des avions qui sont plus lentes (basses fréquences) mais plus longues. L'utilisation de la technique de tilt coordination (consistant à incliner le simulateur pour utiliser une composante de la gravité pour restituer une accélération) permet de restituer facilement des accélérations lentes mais soutenues, sans nécessiter de grands débattements. Très utilisée en simulation de vol, cette technique est plus délicate à utiliser en simulation de conduite. Un problème de débattement horizontal pour restituer les accélérations des véhicules a donc rapidement été rencontré par les utilisateurs de simulateurs de conduite dynamiques.
- Simuler la conduite implique parfois également de simuler un trafic, ce qui augmente la complexité du logiciel de simulation. La puissance de calcul nécessaire au bon fonctionnement de la simulation augmente alors également. Ce trafic est nécessaire pour le réalisme de la simulation et peut même parfois devenir indispensable dans certains cas d'études.
- Bien souvent, les simulateurs de conduite sont utilisés pour étudier le comportement du conducteur, où pour l'entraîner à savoir réagir correctement dans des situations accidentogènes. Le conducteur doit donc posséder une expérience a priori de conduite réelle. Il possède de ce fait des attentes par rapport au mouvement qu'il doit ressentir dans le simulateur. Au contraire, les simulateurs de vol sont souvent conçus pour apprendre à piloter à des novices, qui n'ont par conséquent aucune expérience de vol réel. Les exigences en termes de réalisme de la simulation sont donc souvent moindres pour la simulation de vol que pour la simulation de conduite automobile.

Ces quelques différences mettent en évidence que bien que présentant au premier abord beaucoup de similitudes, la simulation de vol et la simulation de conduite automobiles sont bel et bien différentes. Il existe toutefois des champs de recherche encore ouverts et communs aux deux activités. Il s'agit par exemple de la recherche sur la perception du mouvement, sur les lois de commande des simulateurs dynamiques ou encore sur le réalisme de la restitution visuelle (informatique graphique).

4.1.2. Evolution des simulateurs de conduite automobile

La simulation de conduite automobile ne possède pas d'historique clairement établi, contrairement à la simulation de vol. Cependant, le premier simulateur de conduite est connu. Il s'agit du simulateur Sensorama (Figure 39), connu par ailleurs pour être le premier dispositif de réalité virtuelle, développé par Morton Heilig (Heilig 1962) pour présenter sa vision de l'avenir du cinéma. Ce simulateur très immersif pour l'époque permet de simuler le déplacement (non interactif) d'une motocyclette dans les rues de Brooklyn, avec un son stéréophonique, un visuel en couleurs et en stéréoscopie, des vibrations, du vent et même des odeurs.



Figure 39 – Sensorama Simulator (Heilig 1962)

Par la suite, d'autres simulateurs virent le jour, mais n'étaient pas complètement interactifs, dans le sens où le conducteur ne faisait que ralentir ou accélérer la vitesse de défilement d'un film. Il faut attendre le début des années 1970 avec le simulateur VPI-SU, développé conjointement par General Motors et le Virginia Polytechnic Institute (VPI) pour avoir un des premiers simulateurs de conduite dynamique et interactif. Dans les années 1980, ce sont les organismes en charge de la sécurité routière qui ont construit leurs propres simulateurs de conduite, suivis par la plupart des constructeurs automobiles à la fin des années 1980, début des années 1990. On citera entre autres et par ordre chronologique de mise en service :

- la première génération du simulateur Hysim développé par le Human Factor Laboratory de la Federal Highway Administration FHWA (USA),
- le premier simulateur du VTI (institut de recherche suédois sur la sécurité routière),
- le DaimlerChrysler simulator,
- le simulateur VTI-II,
- le simulateur Clio (Renault),
- le simulateur VIRTTEX (Ford),
- ...

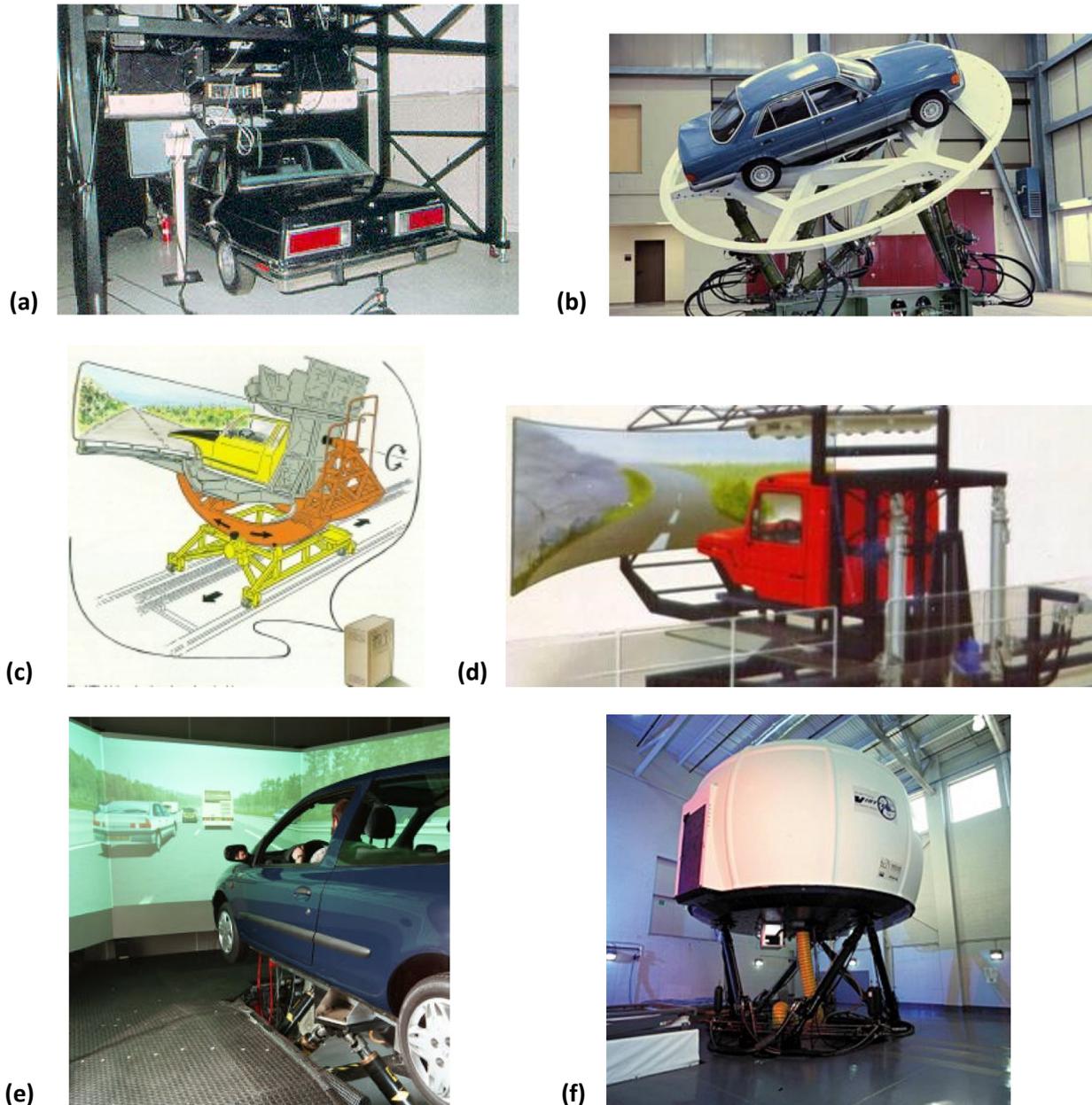


Figure 40 – Simulateurs de conduite automobile interactifs des années 1980 à 2000.

- (a) *Première génération du simulateur HYSIM développé en 1983 par le Human Factor Laboratory de la Federal Highway Administration FHWA (USA).*
- (b) *Simulateur DaimlerChrysler développé à partir de 1985.*
- (c) *Premier simulateur du VTI (institut de recherche suédois sur la sécurité routière) en 1984.*
- (d) *Simulateur de camions VTI-II développé vers 1990 pour une compagnie d'assurances.*
- (e) *Simulateur Clio (Renault) développé en 1999.*
- (f) *Simulateur VIRTTEX (Ford) développé en 2001.*

Les premiers simulateurs de conduite dynamiques présentaient généralement une architecture mécanique dédiée pour la restitution du mouvement, comme par exemple les simulateurs VTI. Par la suite, l'utilisation de robots parallèles (type plate-forme Gough-Stewart) s'est généralisée, le premier simulateur utilisant ce type de restituteur étant le simulateur Daimler-Chrysler. Cependant, les limites des robots parallèles ont vite été atteintes pour le cas particulier de la simulation de conduite automobile.

En effet dans ce cas, et contrairement à la simulation de vol comme nous l'avons vu précédemment, les accélérations horizontales de la voiture sont brusques (hautes fréquences), ce qui nécessite un fort débattement horizontal pour les restituer. Ce problème particulier a été partiellement résolu en utilisant des robots plus gros. Le simulateur VIRTTEX par exemple, permet des déplacements de $\pm 1,60$ m autour de sa position neutre (Artz, et al. 2001), alors que le simulateur Clio ne dispose que d'un débattement en translation de ± 22 cm (Reymond, Heidet, et al. 2000).

Ces débattements n'étant toujours pas suffisants, de nouvelles architectures mécaniques ont vu le jour et équipent aujourd'hui les simulateurs les plus performants. Ces simulateurs sont appelés simulateurs *haute-fidélité*. Les simulateurs à architecture à 8 degrés de liberté (8 DdL ou 8 DoF) utilisent toujours une plate-forme Gough-Stewart, mais au lieu de fixer la base de la plate-forme au sol, elle est montée sur une structure à double rails (rails XY) permettant des débattements horizontaux de plusieurs mètres. Le premier simulateur utilisant cette architecture a été le simulateur NADS (National Advanced Driving Simulator, Figure 41.a) de l'University of Iowa, commencé en 1992 et opérationnel en 2002. Il possède un débattement horizontal de 20 m, dans le sens longitudinal comme dans le sens latéral. Il possède également une table vibrante dont la bande passante s'élève à 20 Hz et qui peut tourner autour de son axe vertical de 330°.

Le simulateur ULTIMATE de Renault (Figure 41.b) a été mis en fonctionnement en 2004. Il utilise le même type d'architecture que NADS et permet des déplacements de 7 x 7 m (Dagdelen, Berlioux, et al. 2006). Plus récemment, Toyota a mis en service son propre simulateur de conduite (Figure 41.c) utilisant encore une fois la même structure que NADS et permettant cette fois des déplacements de 35 m selon l'axe longitudinal et 20 m selon l'axe latéral. Enfin, la société Oktal développe actuellement un simulateur de conduite du même type pour le département « Transport et Infrastructure » de l'Université de Tongji en Chine. La mise en service devrait avoir lieu fin 2010.



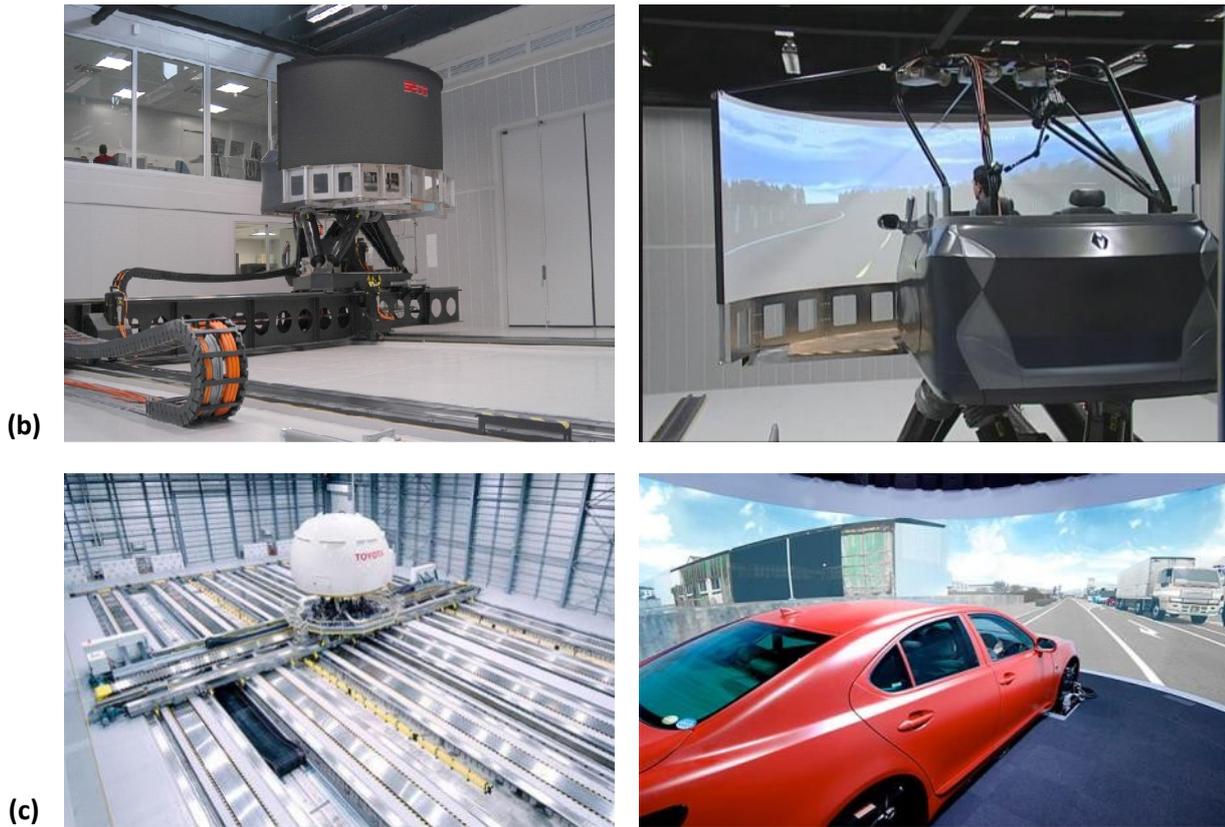


Figure 41 – Simulateurs « haute fidélité » à architecture mécanique à 8 degrés de liberté.

La cabine est montée sur une plate-forme de type Gough-Stewart à 6 degrés de liberté, dont la base est positionnée sur un rail XY permettant des translations plus importantes selon les axes longitudinal et latéral.

- (a) **Vues extérieure et intérieure de NADS (National Advanced Driving Simulator) de l'University of Iowa. Le rail XY permet des déplacements longitudinaux de 20 m et latéraux de 20 m.**
- (b) **Vues extérieure et intérieure du simulateur ULTIMATE au Technocentre de Renault. Le rail XY permet des déplacements longitudinaux de 7 m et latéraux de 7 m.**
- (c) **Vues extérieure et intérieure du simulateur de Toyota. Le rail XY permet des déplacements longitudinaux de 35 m et latéraux de 20 m.**

D'autres simulateurs classés également dans la catégorie des simulateurs « haute fidélité » ont une architecture mécanique dédiée. C'est le cas des simulateurs DESDEMONA au TNO (Organisation Néerlandaise pour la Recherche Scientifique Appliquée), du simulateur KUKA du Max Planck Institute (MPI) basé à Tübingen (Allemagne) ou encore du simulateur VTI-III. DESDEMONA (2005) est basé sur une architecture type centrifugeuse permettant une accélération constante pendant une durée infinie, KUKA (2007) sur le concept de robot série et VTI-III (2004) a repris le concept de VTI-I et VTI-II en rajoutant une rotation verticale de 90° permettant d'utiliser le rail dans le sens longitudinal ou dans le sens latéral.

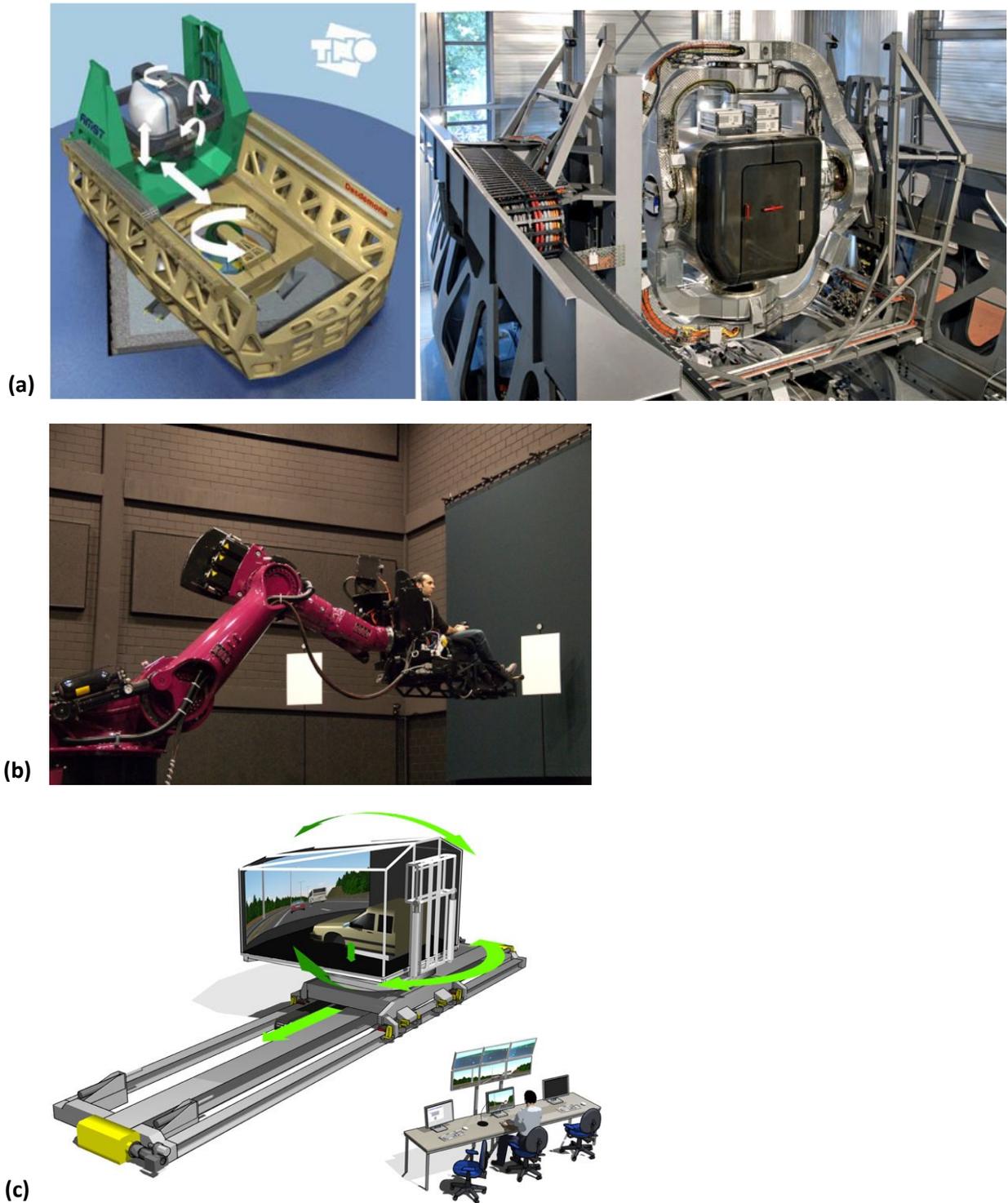


Figure 42 – Simulateurs « haute fidélité » à architecture mécanique dédiée.

(a) *Simulateur DESDEMONA (2005) au TNO, basé sur une architecture type centrifugeuse.*

(b) *Simulateur KUKA du MPI (2007), basé sur une architecture type robot série.*

(c) *Simulateur VTI-III (2004) basé sur les architectures de VTI-I et VTI-II. Une rotation à 90° de la cabine permet d'utiliser le rail dans le sens longitudinal ou dans le sens latéral.*

Les évolutions des simulateurs de conduite n'ont pas porté uniquement sur les systèmes de restitution dynamique bien entendu. Tous les sous-systèmes composant le simulateur ont également évolués au fil des ans, que ce soit au niveau de la restitution au volant, de la restitution des vibrations, de la restitution sonore... On notera également que

l'informatique a suivi une forte évolution ces dernières années, particulièrement l'informatique graphique, grâce notamment à l'industrie du jeu vidéo et du cinéma. Ainsi un grand nombre de simulateurs statiques (c'est-à-dire sans restitution inertielle) ont vu le jour et offrent, pour un prix très inférieur à celui des simulateurs présentés précédemment, un système compact avec une restitution visuelle de relativement bonne qualité. On peut citer comme exemple le simulateur Eco² (Figure 43.a) développé par Renault et Oktal.

On notera également qu'en fonction des études expérimentales envisagées, la restitution inertielle n'est pas forcément nécessaire. Par exemple, le simulateur d'éclairage de Renault (Figure 43.b) permet de tester la chaîne de commande des optiques de la voiture et de simuler l'éclairage obtenu sur route. Ce simulateur ne propose aucune restitution inertielle car elle ne présente pas d'apport pour ce genre d'études.

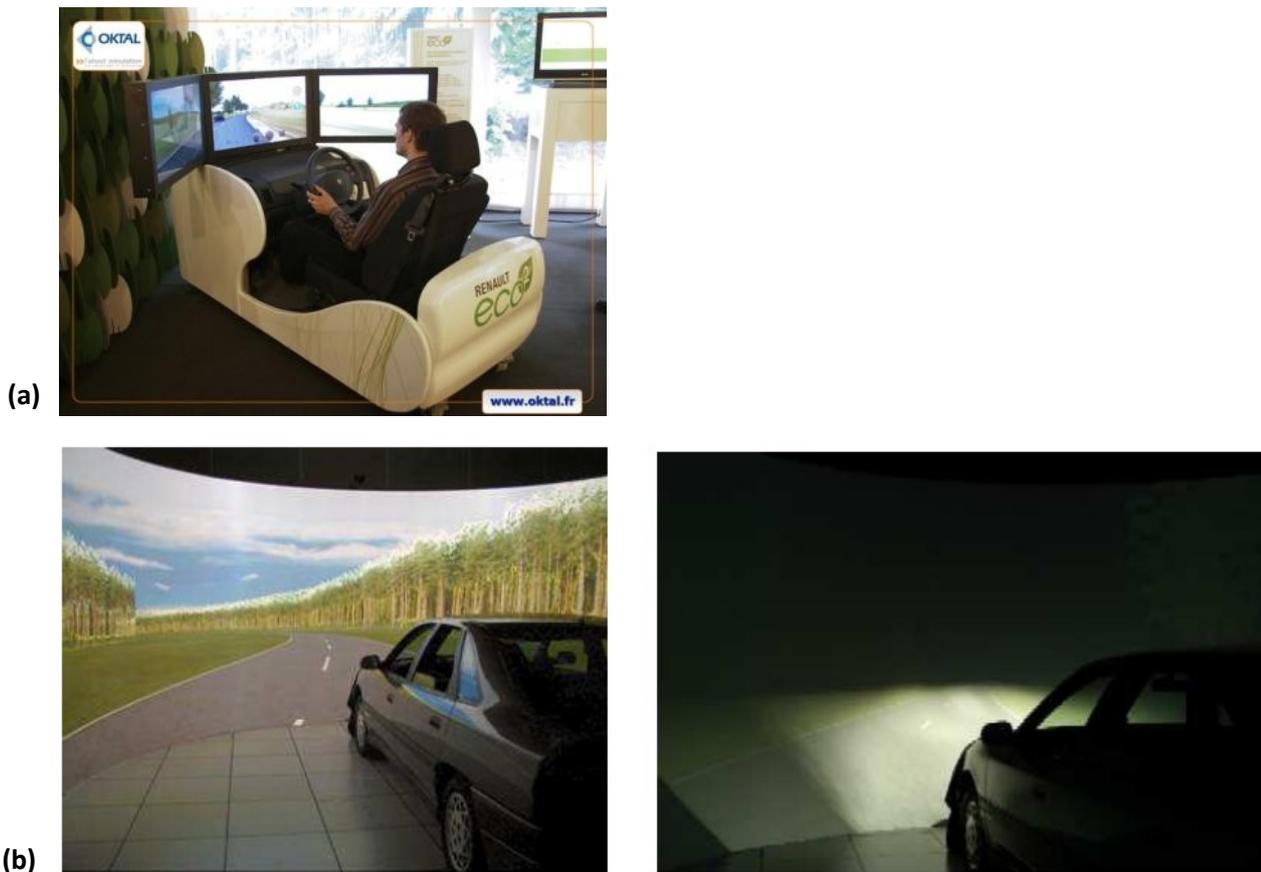


Figure 43 – Exemples de simulateurs statiques.

- (a) *Simulateur Eco² développé par Renault et Oktal pour étudier l'éco-conduite (conduite écologique)*
- (b) *Premier simulateur d'éclairage (SE1) de Renault.*

4.2. Restituteurs sensoriels

Nous allons à présent consacrer cette partie aux restitutions sensorielles mises en place dans les simulateurs de conduite. Nous suivrons le même ordre que pour la présentation des voies sensorielles pour la perception du mouvement dans le Chapitre 2 : nous commencerons par les interfaces visuelles, puis nous continuerons par les restituteurs inertiels et enfin nous terminerons par les restitutions somatosensorielles et sonores.

4.2.1. Restitution visuelle

Interfaces visuelles

Les interfaces visuelles utilisables en simulation de conduite sont de façon générale les mêmes que celles utilisées en réalité virtuelle. Pour une description complète et détaillée de chaque système de vision on renverra à la lecture du chapitre 9 du Volume 2 (Interfaçage, immersion et interaction en environnement virtuel) du *Traité de la Réalité Virtuelle* (Fuchs 2006). On peut les classer en différentes catégories génériques.

- Les écrans à facettes, cylindriques ou sphériques sur lesquels une (ou plusieurs) image(s) est (sont) projetée(s) par un (des) vidéoprojecteur(s). Les écrans peuvent être fixes par rapport au sol, comme pour le simulateur Clio (Figure 40.e), ou être déplacés avec le cockpit, comme pour le simulateur ULTIMATE (Figure 41.b).
- Les écrans LCD, utilisant la même technologie que les écrans d'ordinateur ou les téléviseurs LCD. Ces écrans, de taille inférieure à ceux de la catégorie précédente, présentent l'avantage d'être peu coûteux et très facilement utilisables. Leur relative faible taille peut être compensée par leur nombre. Il est tout à fait possible de mettre plusieurs écrans LCD côte à côte pour augmenter le champ de vision, comme sur le simulateur Eco² (Figure 43.a) par exemple. Toutefois dans ce cas, la jonction entre les écrans est très visible avec les bords des écrans.
- Les interfaces visuelles portables, ou visiocasques (HMD pour *Head-Mounted Display*). Ces dispositifs intègrent des petits écrans LCD placés devant les yeux de l'utilisateur à l'intérieur d'un casque. Ils permettent ainsi une restitution de l'image en stéréoscopie (une image par œil) et une immersion totale du regard car leur utilisation est souvent couplée avec un capteur de localisation et d'orientation de la tête. Cependant ils ne permettent généralement pas d'obtenir un grand champ de vision. De plus ils sont coûteux en terme de puissance de calcul afin d'obtenir une résolution suffisante compte-tenu de la proximité de l'image par rapport à l'œil.

Restitution de la profondeur

Comme nous l'avons vu au Chapitre 3, l'être humain possède plusieurs moyens de percevoir la profondeur et les distances égocentriques : les informations monoculaires, les informations apportées par le mouvement, et les informations binoculaires.

Les informations monoculaires sont pour la plupart restituées en simulation de conduite, car elles ne posent généralement pas de difficulté technique. Toutefois, le champ de vision peut être variable d'un simulateur à un autre, pouvant aller de 40 à 360 degrés.

Un flux optique correspondant au déplacement du véhicule est toujours restitué au conducteur, lui permettant de percevoir des informations de profondeur. Cependant, les indices de parallaxe sont plus rarement restitués en simulation de conduite. En effet, peu de simulateurs intègrent des systèmes de suivi de position de la tête (Kemeny et Panerai 2003), notamment pour des difficultés techniques et par volonté de ne pas équiper le conducteur avec des marqueurs quelconques. Or théoriquement l'image affichée n'est géométriquement correcte que pour un unique point de vue. Il en résulte que les mouvements de tête du conducteur en simulation de conduite génèrent des indices de parallaxe erronés, liés à la géométrie de l'écran et la position du conducteur par rapport à celui-ci, et non liés à la structure de l'environnement virtuel. Toutefois, comme ces mouvements de tête sont relativement limités, on peut mettre en doute leur importance et leur influence sur le mouvement perçu.

Enfin, les informations binoculaires sont également peu restituées dans les simulateurs de conduite n'utilisant pas de visiocasque (Kemeny et Panerai 2003). En effet, la plupart des projections sur écran en simulation de conduite se font en monoscopie. Par ailleurs, les systèmes de projection stéréoscopiques actuels ne permettent de restituer que la disparité binoculaire. L'accommodation et la vergence des yeux du conducteur ne correspondent donc pas à celles en conditions réelles.

Champ de vision

Nous avons vu que la vision périphérique est particulièrement sensible au mouvement par rapport à la vision centrale. Le phénomène de vection sera donc plus fort lorsque cette zone de la rétine sera stimulée (Berthoz, Pavard et Young 1975). Dans le cadre de la simulation de conduite, il a donc été suggéré qu'un champ de vision minimal de 120° était nécessaire (Kemeny et Panerai 2003)(Jamson 2000). Toutefois, cette valeur dépend du simulateur et notamment de la qualité des autres restitutions sensorielles, ainsi que des situations simulées. Un champ de vision plus important (150°, 180° ou plus) permet d'améliorer l'immersion, notamment celle du regard, lorsque le conducteur est amené à tourner la tête par exemple.

Dans certains simulateurs où l'écran ne couvre pas complètement (voir peu) le champ de vision, le champ de vision géométrique (champ de vision de la caméra virtuelle, voir 4.3.5 et Chapitre 5) est parfois augmenté afin de compenser le manque (Mourant, et al. 2007). Comme nous le verrons par la suite, ce procédé modifie aussi la perception de la vitesse (Diels et Parkes 2009).

Contraste et luminosité

Plusieurs études (Kemeny et Panerai 2003), menées aussi bien sur la perception de la vitesse et de la direction de déplacement de motifs lumineux ((Stone et Thompson 1992), (Weiss, Simoncelli et Adelson 2002) et (Thompson, Brooks et Hammett 2006)), que sur la perception de vitesse en simulation de conduite (Snowden, Stimpson et Ruddle 1998), ont montré que la luminosité et surtout le contraste de l'image ont une influence sur la perception de la vitesse. Même en conditions réelles, le brouillard peut par exemple réduire la sensation de vitesse. Toutefois, le réglage du contraste et de la luminosité en simulation de conduite est dépendant des capacités techniques du restituteur utilisé (vidéoprojecteur, dalle LCD...).

4.2.2. Restitution inertielle

Intérêt de la restitution inertielle

Les simulateurs dits *dynamiques* restituent une partie des accélérations du véhicule en déplaçant directement le conducteur dans la salle de simulation au moyen d'actionneurs mécaniques hydrauliques, pneumatiques ou électriques. Si les restitutions visuelles, sonores et somatosensorielles sont évidemment nécessaires en simulation de conduite, de nombreuses études indiquent que la restitution des accélérations du véhicule favorise le réalisme de la conduite. Si le but du simulateur est d'étudier l'interaction du conducteur avec le véhicule, il est important que le comportement du conducteur soit le plus proche possible de celui en conduite réelle. En effet, dans ce cas le domaine de validité du simulateur, et donc des études qui y sont menées, est défini par les écarts de comportement du conducteur entre les conditions simulées et les conditions réelles.

La littérature fournit plusieurs études montrant l'apport de la restitution dynamique pour la fidélité du comportement du conducteur.

- Dans les expériences de (Parrish et Martin 1976), (Reid et Nahon 1988), et (Hall 1989), les sujets ont verbalement préféré les configurations dynamiques aux configurations statiques.
- Dans leurs expériences, (Repa, Leucht et Wierwille 1982), (Wierwille, Casali et Repa 1983) et (I. Siegler, et al. 2001) ont montré que l'aptitude du conducteur à faire des tâches basiques de conduite dépend de la restitution inertielle.
- (G. Raymond, A. Kemeny et J. Droulez, et al. 2001) montrent dans leur expérience l'importance significative des accélérations latérales pour une tâche de régulation de vitesse dans une route incurvée.

On peut rajouter à cela que la restitution inertielle favorise la crédibilité de la simulation, créant ainsi un biais cognitif favorable au renforcement de la perception du mouvement propre : donner au sujet l'impression que le mouvement visuel est effectivement accompagné d'un mouvement physique renforce lavection (Wright, DiZio et Lackner 2006).

L'utilisation de la restitution inertielle permet aussi de diminuer la cinétose (voir 3.2.3), plus connue sous le nom de mal du transport, mal de mer ou encore mal du simulateur. La cinétose engendre plusieurs effets indésirables, allant d'un léger inconfort jusqu'au vomissement, en passant par l'augmentation de la salivation ou encore le floutage de la vision. Elle provient essentiellement d'un conflit entre le mouvement physique *attendu* et le mouvement physique *effectivement ressenti* (Bos et Bles 2002). Le mouvement physique attendu est fonction principalement du mouvement perçu visuellement. Ainsi une différence entre le mouvement visuel et le mouvement physique a généralement pour conséquence le déclenchement de la cinétose. C'est ce qui survient par exemple sur un bateau dans le cas du mal de mer. Si la personne regarde le bateau, elle ne voit rien bouger : elle s'attend donc à ne rien ressentir. Mais elle ressent tout de même les mouvements du bateau sur la mer, ce qui provoque le conflit.

On comprend donc que la restitution inertielle du simulateur, lorsqu'elle est correctement effectuée, permet de réduire la différence entre le mouvement visuel et le mouvement physiquement ressenti, ce dernier étant nul pour les simulateurs statiques. Ainsi

le mal des simulateurs est moins fréquent dans les simulateurs de conduite dynamiques (7 fois moins dans l'expérience menée par (Curry, et al. 2002), et 12 fois moins dans l'expérience de (Watson 2000)).

Tilt Coordination

La restitution inertielle utilise souvent la technique dite de *tilt coordination*, ou de récupération de gravité. Elle met à profit l'ambiguïté sensorielle des organes otolithiques (entre accélération horizontale et inclinaison, voir 2.3.2) pour restituer des sensations d'accélération dans le plan horizontal du conducteur. Son utilisation est décrite ici dans le cas de la restitution des sensations d'accélération longitudinales du véhicule. Cette description est généralisable par la suite à n'importe quelle direction du plan horizontal.

La technique de *tilt coordination* (Figure 44) consiste à incliner la plate-forme autour de l'axe latéral passant par les systèmes vestibulaires de sorte qu'une composante de la gravité soit interprétée comme une accélération longitudinale. L'inclinaison du simulateur stimule les otolithes de la même façon qu'une accélération longitudinale et provoque ainsi l'illusion.

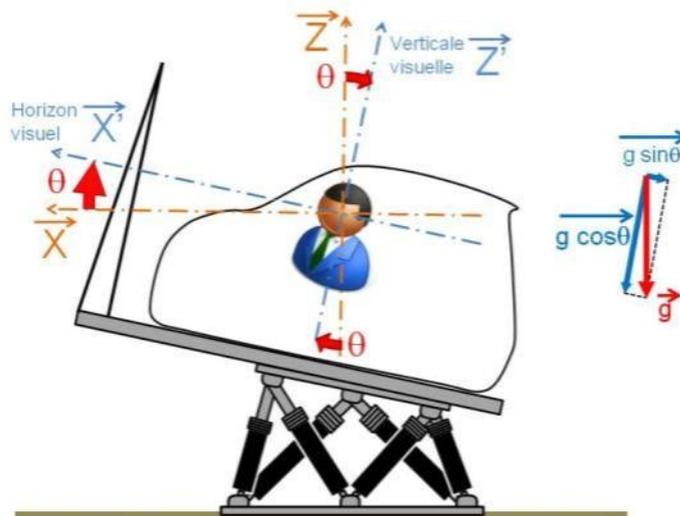


Figure 44 - Illustration de la technique de tilt coordination.

Lorsque le simulateur est incliné d'un angle θ et que les indices visuels ne permettent pas de détecter une inclinaison, l'utilisateur a alors la sensation d'une accélération longitudinale d'amplitude $g \cdot \sin\theta$

Essayons de quantifier l'accélération restituée par la technique de *tilt coordination* lorsque la plate-forme est inclinée d'un angle θ . On peut alors décomposer l'accélération de la gravité à laquelle est soumise le conducteur en :

- une accélération d'amplitude $g \cos\theta$ (g étant la valeur de la gravité terrestre) dans la direction de sa verticale visuelle,
- et une accélération d'amplitude $g \sin\theta$ dans la direction de son horizontale visuelle.

Dans le cas de faibles orientations ($\theta \ll 1$), on peut approximer $\cos\theta$ par 1, et $\sin\theta$ par θ . Le conducteur perçoit alors une accélération d'amplitude g selon sa verticale (comme s'il n'était pas incliné) et d'amplitude $g\theta$ selon son horizontale visuelle. L'accélération horizontale restituée par *tilt coordination* pour un angle d'inclinaison θ est donc une accélération d'amplitude $g\theta$.

Pour le bon fonctionnement de cette technique, il ne faut pas que l'ambiguïté sensorielle des organes otolithiques puisse être résolue par d'autres voies sensorielles. En particulier, il ne faut pas que des indices visuels permettent au conducteur de savoir qu'il est en train d'être incliné, et non en train d'accélérer. De ce fait, si l'écran n'est pas fixe par rapport à la plate-forme, l'affichage doit être modifié de sorte que l'environnement visuel reste stable pour le conducteur. De plus, l'inclinaison doit se faire à une vitesse de rotation inférieure au seuil de détection des canaux semi-circulaires ($3^\circ/s$ selon (Groen et Bles 2004)).

Notons également que la technique de *tilt coordination* est encore sujette à controverse. En effet, la détection d'une inclinaison semble ne pas dépendre uniquement des indices visuels et vestibulaires, mais aussi d'indices somatosensoriels (Mittelstaedt 1996). (Bringoux, et al. 2002) montrent par exemple que des personnes ayant un labyrinthe vestibulaire déficient sont aussi précises que des personnes saines pour la détection d'inclinaison dans le noir. D'autre part, cette technique présente des limites, notamment dans le cas du freinage et de l'arrêt. Dans ce cas particulier, le véhicule passe quasi-instantanément d'une décélération constante (pendant la phase de freinage) à une décélération nulle (véhicule à l'arrêt). Or la technique de *tilt coordination* ne permet pas de passer aussi rapidement d'une inclinaison correspondant à la décélération à restituer, à une inclinaison nulle. Il en résulte un conflit entre d'une part le mouvement physique du simulateur en train de revenir en position horizontale, et d'autre part l'absence de mouvement visuel lorsque le véhicule est arrêté.

Architectures mécaniques utilisées

Comme nous l'avons vu dans la première partie de ce chapitre présentant l'évolution des simulateurs de conduite, il existe de nombreuses architectures mécaniques différentes utilisées en simulation. On pourra toutefois remarquer la généralisation des plate-formes parallèles. Les robots parallèles présentent l'avantage de procurer un positionnement précis. En effet, les erreurs de mesure et de positionnement sur chaque articulation sont moyennées alors qu'elles s'additionnent sur un robot série comme par exemple celui du simulateur KUKA du MPI (Figure 42.b). De plus, les robots parallèles permettent de déplacer une charge plus importante que les robots séries. En effet sur un robot parallèle, la charge se répartit sur chaque actionneur alors que sur un robot série, chaque actionneur doit supporter la totalité de la charge. Gough et Stewart ont proposé dans les années 1970 une architecture de robot parallèle à 6 degrés de liberté (6 DdL, ou 6 DoF pour *Degrees of Freedom*) très utilisée dans la simulation (de vol ou de conduite). Leur robot est composé de 2 plateaux de forme environ triangulaire et de 6 vérins. Les vérins relient les sommets des triangles, comme on peut le voir dans la Figure 45.

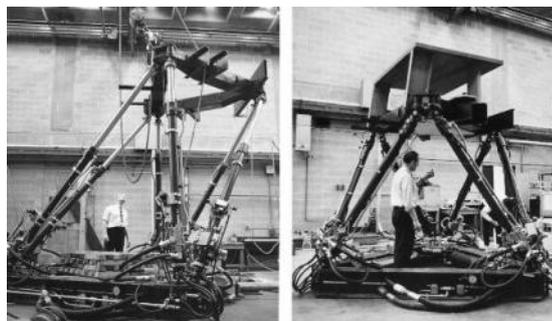


Figure 45 – Exemple d'une plate-forme de type Gough-Stewart à 6 degrés de liberté, dans sa position au repos sur l'image de droite.

Les vérins peuvent être hydrauliques, pneumatiques ou électriques. Dans les deux premiers cas, ce sont des actionneurs de type « piston » dont des distributeurs (des servovalves généralement) pilotent le débit d'huile / d'air en entrée. Le débit est régulé en fonction de l'allongement courant et de l'allongement souhaité du vérin.

Les vérins électriques sont des systèmes vis / écrou à billes. Un moteur électrique vient faire tourner la partie « écrou » du vérin, ce qui a pour effet de faire sortir la tige (partie « vis » du vérin). Le pilotage s'effectue alors en pilotant la rotation du moteur : en comptant le nombre de tours du moteur, on peut facilement en déduire l'allongement du vérin avec le pas du système vis / écrou.

Les vérins électriques présentent l'avantage d'être moins coûteux et plus faciles à entretenir. Cependant, les vérins hydrauliques / pneumatiques peuvent développer plus de puissance et peuvent atteindre des vitesses linéaires généralement plus grandes. Un de leurs inconvénients toutefois est de nécessiter une centrale (hydraulique / pneumatique) pour mettre sous pression l'huile / l'air arrivant aux vérins.

Quelle que soit la nature du vérin et son mode de pilotage, c'est toujours sa longueur qui est pilotée. Or l'utilisateur d'un simulateur cherche plutôt à piloter le robot en position. En d'autres termes, ce qu'on cherche à atteindre lorsqu'on pilote un simulateur, c'est une certaine position, et non un certain ensemble de longueurs de vérins. Il faut donc établir la cinématique inverse du système mécanique que l'on utilise, qui donne les commandes à envoyer pour chaque actionneur qui le compose, en fonction de la position à atteindre. Bien entendu, la position nécessite d'être correctement paramétrée. L'Annexe A fournit un exemple de paramétrage et de calcul de cinématique inverse pour la plate-forme MOOG de type Gough-Stewart utilisée sur le simulateur SAAM (voir 5.2.4). Il va de soi également que plus l'architecture mécanique utilisée sur le simulateur sera compliquée et plus le calcul de la cinématique inverse le sera également. Le simulateur DESDEMONA par exemple, a été compliqué à piloter et à pouvoir être utilisé lors de sa mise en service.

Stratégies de commande

Les déplacements du simulateur étant limités physiquement (positions maximales, vitesses maximales, accélérations maximales...), reproduire la trajectoire du véhicule simulé à l'identique n'est généralement pas possible. Seule une partie des accélérations du véhicule simulé peut être rendue : une transformation des accélérations du véhicule en trajectoire admissible par le simulateur est nécessaire. Cette transformation est appelée stratégie de commande (*motion cueing algorithm*, *motion drive algorithm*, ou encore *washout filter* en anglais). Elle doit réaliser un compromis entre :

- optimiser la restitution des accélérations et
- maintenir le simulateur dans ses limites physiques.

Une description plus détaillée des différentes stratégies de commande existantes sera faite dans la partie 4.3.4.

Intérêt des rails

La restitution des accélérations avec une plate-forme de type Gough-Stewart se fait généralement par la combinaison de deux techniques. Une première partie des accélérations (généralement la partie haute-fréquence) est restituée directement par les mouvements du simulateur. Une autre partie (généralement la partie basse-fréquence) est restituée par *tilt*

coordination. Le principal inconvénient de cette façon de procéder est qu'il est généralement difficile d'obtenir une complémentarité de ces deux techniques. En d'autres termes, tout ce qui n'est pas restitué par une des deux techniques ne l'est pas forcément par l'autre. La Figure 46 illustre cette non-complémentarité.

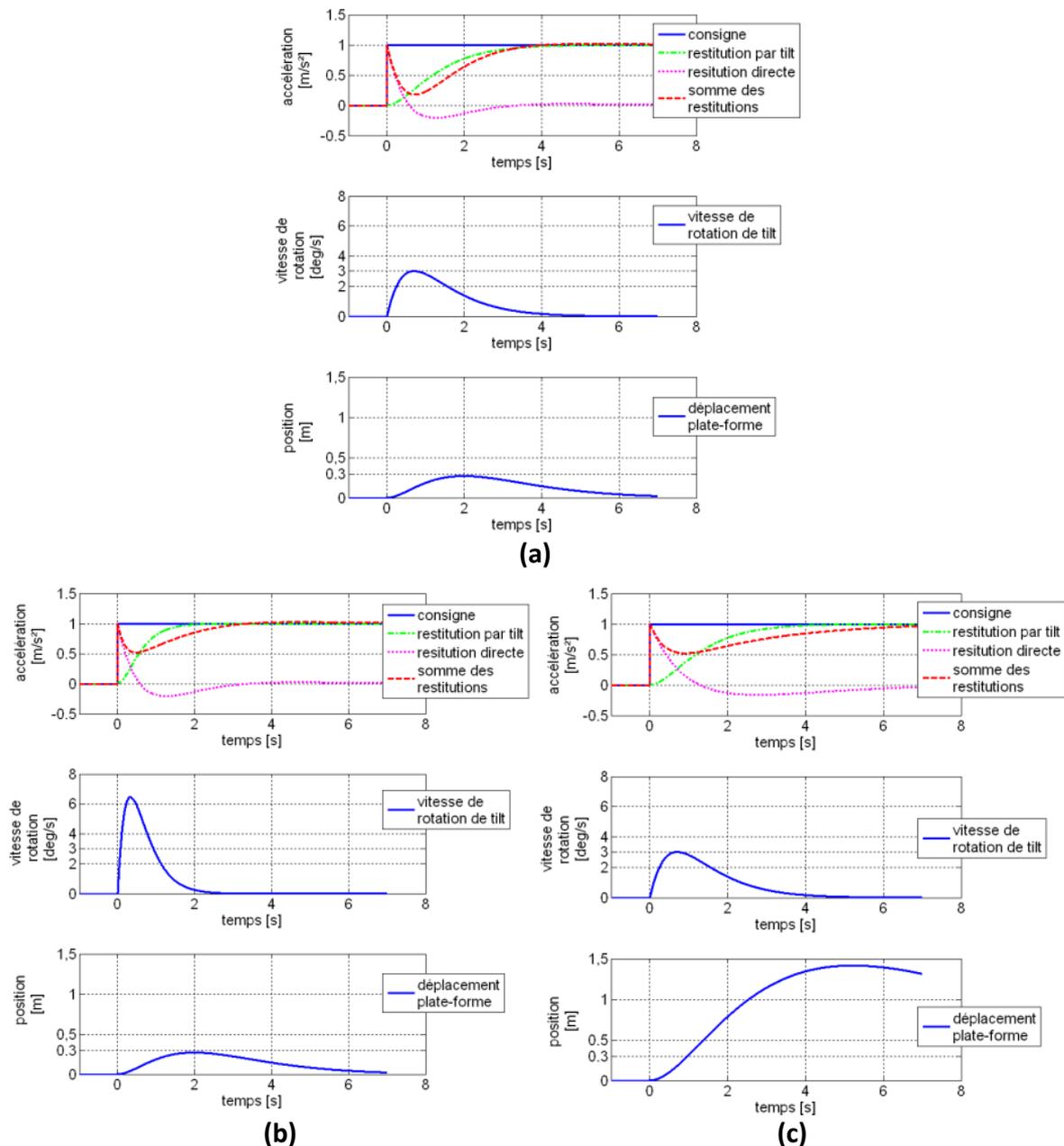


Figure 46 – Comparaison de 3 réglages de stratégie de commande différents.

Pour chaque réglage (a, b ou c), le graphe du haut présente la consigne d'accélération (un échelon), la partie restituée directement par les translations du simulateur, la partie restituée par tilt coordination, et la somme de ces 2 restitutions. Le graphe du milieu présente la vitesse de rotation du simulateur correspondant à l'inclinaison de tilt coordination. Le graphe du bas présente le déplacement du simulateur correspondant à la restitution directe. La somme des restitutions est forcément différente de la consigne d'accélération.

- (a) La pulsation de coupure de la restitution directe (filtrage passe-haut) est de 1 rad/s (soit 0.159 Hz) : les déplacements du simulateur ne dépassent pas 0.3 m. La pulsation de coupure de la restitution par tilt (filtrage passe-bas) est de 1.4 rad/s (soit 0.223 Hz) : la vitesse d'inclinaison ne dépasse pas 3 deg/s.
- (b) La pulsation de coupure de la restitution par tilt (filtrage passe-bas) a été augmentée : elle est ici de 3 rad/s (soit 0.478 Hz) ; la vitesse d'inclinaison atteint cette fois environ 6.5 deg/s.
- (c) La pulsation de coupure de la restitution directe (filtrage passe-haut) a été diminuée : elle est ici de 0.25 rad/s (soit 0.159 Hz) ; les déplacements du simulateur atteignent cette fois presque 1.5 m.

On voit sur la Figure 46.a que la somme de la restitution directe (filtrage passe-haut) et de la restitution par *tilt coordination* (filtrage passe-bas) est différente du créneau d'accélération de départ. Cette différence provient de la non-complémentarité des filtres utilisés. Deux solutions sont possibles pour atténuer cette différence : soit on augmente la borne supérieure de la plage de fréquences restituées par *tilt coordination* (Figure 46.b), soit on diminue la borne inférieure de la plage restituée directement par les mouvements du simulateur (Figure 46.c).

La première solution est difficilement envisageable : si des fréquences trop élevées sont restituées par *tilt coordination*, les vitesses d'inclinaison du simulateur risquent d'être supérieures au seuil de détection des canaux semi-circulaires. La technique de *tilt coordination* ne serait alors plus effective. C'est ce qu'on peut observer sur la Figure 46.b : la vitesse de rotation du simulateur atteint 6,5 °/s alors que le seuil de détection est de 3 °/s.

La deuxième solution quant à elle est envisageable à condition d'avoir un espace de travail plus grand. On voit sur la Figure 46.c qu'en diminuant la fréquence de coupure de la restitution directe (filtrage passe-haut), on restitue une plus grande partie de la consigne d'accélération mais qu'en revanche les déplacements correspondants du simulateur sont plus importants (presque 1.5 m au lieu de 0.3 m pour la Figure 46.a). En effet, plus la fréquence de l'accélération restituée est basse, plus le déplacement correspondant est grand et donc nécessite une architecture mécanique avec un débattement plus important. C'est dans ce but qu'ont été conçus les simulateurs intégrant un (ou plusieurs) rail(s). Ils augmentent considérablement l'espace de travail en translations par rapport à une plateforme Gough-Stewart et permettent donc de restituer directement une plus grande partie des accélérations, pendant une durée plus longue.

4.2.3. Restitutions sonores et somatosensorielles

Conduire une automobile est une action qui repose également sur la modalité auditive. En effet plusieurs sources sonores internes au véhicule (groupe moto-propulseur, turbo, démarreur...) et externes (bruit de roulement, bruit aérodynamique, bruit du trafic...) procurent au conducteur des informations auditives sur le véhicule et l'environnement de conduite. Ces sources sonores doivent bien sûr être restituées pour le réalisme de la simulation de conduite. (Gauduin et Boussard 2009) montrent qu'il est possible avec seulement 2 enceintes situées par exemple dans les portières des véhicules de restituer toutes ces sources et de les localiser dans l'espace grâce à des techniques de spatialisation sonore. Ces techniques (panning et restitution transaurale) permettent soit de localiser précisément la source, comme par exemple le bruit d'un véhicule du trafic, soit de faire une restitution plus diffuse, comme pour le bruit de roulement ou le bruit aérodynamique par exemple.

Nous avons vu dans le Chapitre 2 que des informations tactiles (provenant des capteurs de pression de la peau notamment) venaient renforcer la sensation de mouvement provenant des modalités vestibulaires et visuelles. Sur un simulateur dynamique, ces capteurs somatosensoriels sont excités de la même manière qu'en conduite réelle, et de façon généralement non dissociable de la restitution inertielle. Il n'y a donc pas de reconstituteurs spécifiques pour ce type de modalité sensorielle. Notons cependant que (de Winter, et al. 2008) ont testé sur un simulateur statique l'apport de 6 systèmes sur la restitution du freinage : 1) un système de tension de la ceinture, 2) un système augmentant

la dureté de la pédale de frein, 3) un volant vibrant, 4) des sons de pneus qui crissent, 5) un siège vibrant, et 6) un siège équipé de vérins pneumatiques dans le dossier. Tous ces systèmes semblent avoir eu un effet positif sur le comportement du conducteur en freinage et/ou en virage.

D'autre part, les interfaces à l'intérieur du cockpit du véhicule (notamment le volant, les pédales et la boîte de vitesse) participent à l'amélioration du réalisme de la simulation de conduite lorsqu'elles procurent un retour d'effort. Ces interfaces doivent être en lien avec le modèle dynamique du véhicule simulé car l'effort qu'elles doivent restituer en dépend. Par exemple, l'effort restitué au volant va dépendre de la vitesse du véhicule simulé, du fonctionnement de la direction assistée, de la surface de la route...

4.3. Architectures logicielles employées

4.3.1. Les différents éléments d'un logiciel de simulation

Les logiciels de simulation de conduite sont généralement composés d'un assemblage de différents codes de calcul gérant les différents aspects de la simulation de conduite. La partie centrale de la simulation de conduite va être le calcul de la trajectoire du véhicule simulé. Ce calcul va s'effectuer selon un modèle dynamique de véhicule, généralement validé par comparaison avec des essais sur route d'un véhicule réel instrumenté. Le modèle dynamique aura comme paramètres : les courbes caractéristiques du moteur (courbes couple / régime moteur pour chaque rapport), les angles des roues, l'écartement des roues, le réglage des suspensions (hauteur initiale, dureté...), le modèle de contact pneu / route, les conditions météorologiques... entre autres.

Ce modèle dynamique reçoit en entrée les actions du conducteur sur le volant, les pédales, la boîte de vitesses, les commandes au volant... Une partie du logiciel de simulation doit donc gérer l'acquisition des actions du conducteur. Ces acquisitions sont généralement cadencées à une fréquence plus élevée, afin de réduire au maximum le délai temporel entre l'action du conducteur et le moment où il pourra percevoir la réaction engendrée sur le véhicule virtuel conduit.

Calculer la trajectoire du véhicule nécessite également de connaître la géométrie de la route pour le contact pneu / route. La route est souvent modélisée de façon discrète, sous forme de maillage en 3 dimensions. Elle n'est donc pas une surface continue, mais un ensemble de triangles (donc de points 3D) duquel est extrapolé une surface. Le maillage doit être suffisamment fin afin de pouvoir restituer la géométrie de la route sans engendrer de phénomènes irréalistes perceptibles par le conducteur. Par exemple si la route est plane, le maillage peut être très grossier. Par contre, dès que la route n'est plus plane, le maillage doit être suffisamment fin pour que le conducteur ne ressente pas les facettes de la route virtuelle.

En plus de la géométrie de la route, le logiciel de simulation a besoin de la géométrie de l'environnement afin de pouvoir calculer l'(les) image(s) à afficher. A cette géométrie de l'environnement doit être jointe une description schématique du réseau routier (type de voie, nombre de voies, feux, stops, priorités...). Cette description servira à la partie du logiciel en charge de générer un trafic autonome. Chaque véhicule du trafic généré se servira de la description du réseau routier ainsi que des règles du code de la route pour calculer ses déplacements via une intelligence artificielle. De plus, chaque véhicule se voit associer une modélisation en 3D pour pouvoir être visuellement représenté.

Pour l'utilisation des simulateurs dynamiques, une partie du logiciel doit piloter les différents éléments de l'architecture mécanique. Ce calcul prend en entrée la trajectoire du véhicule simulé et les éventuels retours d'information renvoyés par le simulateur sur sa position, sa vitesse... Le type d'actionneur à piloter influence fortement cette partie du logiciel de simulation généralement appelée *stratégie de commande* ou encore *motion cueing algorithm*.

Une fois calculées les trajectoires du véhicule conduit et des véhicules du trafic, le son à restituer peut alors être calculé. Il prend en compte le bruit du moteur (en fonction du

régime moteur), les bruits de roulement correspondant aux contacts pneus / route (en fonction de la vitesse du véhicule), le bruit aérodynamique (en fonction également de la vitesse du véhicule) et le bruit des autres véhicules (en fonction de leur régime moteur et de leur position relative pour l'effet Doppler). Enfin, comme les simulateurs sont utilisés pour faire des études expérimentales, les logiciels de simulation incorporent souvent une interface permettant de facilement créer des scénarios reproductibles et paramétrables.

Tous ces différents éléments composant le logiciel de simulation nécessitent de communiquer entre eux pour s'échanger les informations nécessaires. Plusieurs solutions sont possibles. La plus utilisée est l'utilisation d'une mémoire partagée dans laquelle sont écrites à chaque pas de calcul les données à partager entre les différents modules. L'utilisation d'une mémoire partagée présente également l'avantage de rendre le logiciel « clusterisable » (« parallélisable »). En d'autres termes, chaque partie du logiciel de simulation peut être lancée sur un ordinateur distinct, ce qui permet d'accroître les ressources utilisables par chaque module.

4.3.2. Exemple de SCANeR©

Le logiciel de Simulation de Conduite Automobile Normalisée en Réseau, SCANeR© a été développée par Renault dans le cadre du projet européen PROMETHEUS en 1990. Son successeur, SCANeR© II, a été développé conjointement par Renault et Oktal, cette dernière s'occupant de la commercialisation. La nouvelle version SCANeR© Studio (Figure 47) est aujourd'hui la plus récente. Il s'agit d'un ensemble de modules écrits dans un langage orienté objet (C++) et répartis selon une architecture distribuée. Ces modules réalisent entre autres :

- l'acquisition des commandes du conducteur
- l'animation / création d'un scénario de simulation
- la génération d'un trafic autonome
- le calcul de la scène visuelle
- le calcul de l'environnement sonore
- le calcul de la dynamique du véhicule
- le calcul de la trajectoire de la plate-forme (stratégie de commande)
- ...

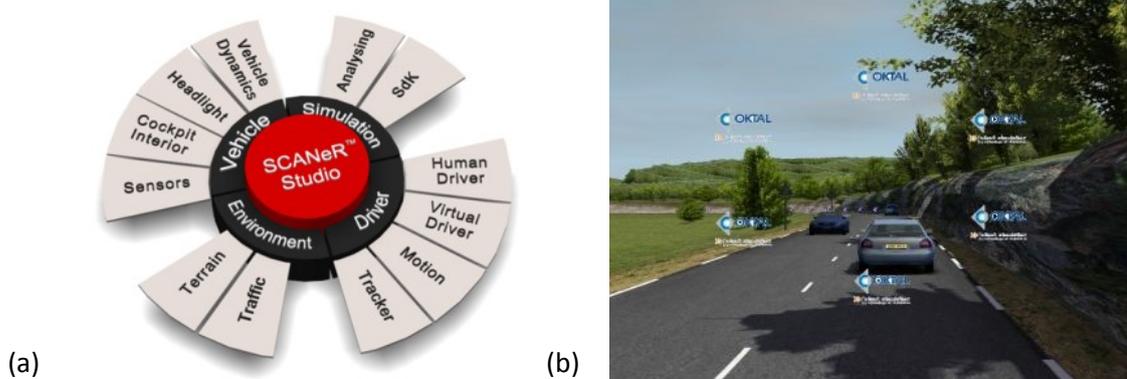


Figure 47 – SCANeR© Studio (source www.scanersimulation.com)

(a) Organisation générale des modules

(b) Rendu visuel de l'environnement de conduite

SCANeR© utilise un système de communication par mémoire partagée présentant l'avantage de facilement paralléliser le logiciel (sur un *cluster*). Chaque module peut être lancé sur une machine (PC) distincte et ainsi profiter de ressources maximales. Les différentes machines utilisées doivent bien entendu être connectées en réseau pour que les modules puissent communiquer. Comme n'importe quel logiciel commercialisé, SCANeR© n'est pas transparent et l'utilisateur ne peut pas modifier les modules à sa guise. Toutefois, une API (*Application Programming Interface*) permet de (re)créer ses propres modules pour répondre à d'éventuels besoins spécifiques.

4.3.3. Exemple de openSimulation

Ces dernières années ont été le théâtre d'une forte montée en puissance de la communauté du logiciel libre. (Filliard, et al. 2010) montrent qu'il est aujourd'hui possible de faire un logiciel de simulation de conduite minimal mais néanmoins *clusterisable* (« parallélisable »), en n'utilisant que des bibliothèques libres. Dans le logiciel qu'ils proposent, chaque module encapsule une ou plusieurs bibliothèque(s) libre(s) pour la réalisation de sa partie et communique avec les autres modules au travers une interface d'échange de messages semblable à celle de SCANeR©.

Ce projet de logiciel libre de simulation de conduite s'appelle openSimulation (Figure 48). Il présente comme SCANeR© l'avantage d'être modulaire : le nombre de modules n'est pas déterminé et on peut en rajouter autant qu'on le désire. De plus, chaque module est complètement transparent car openSimulation est licencié sous LGPL (*Lesser General Public License*, Licence publique générale limitée). Plus de détails peuvent être consultés sur le site : <http://sourceforge.net/projects/opensd2s>.

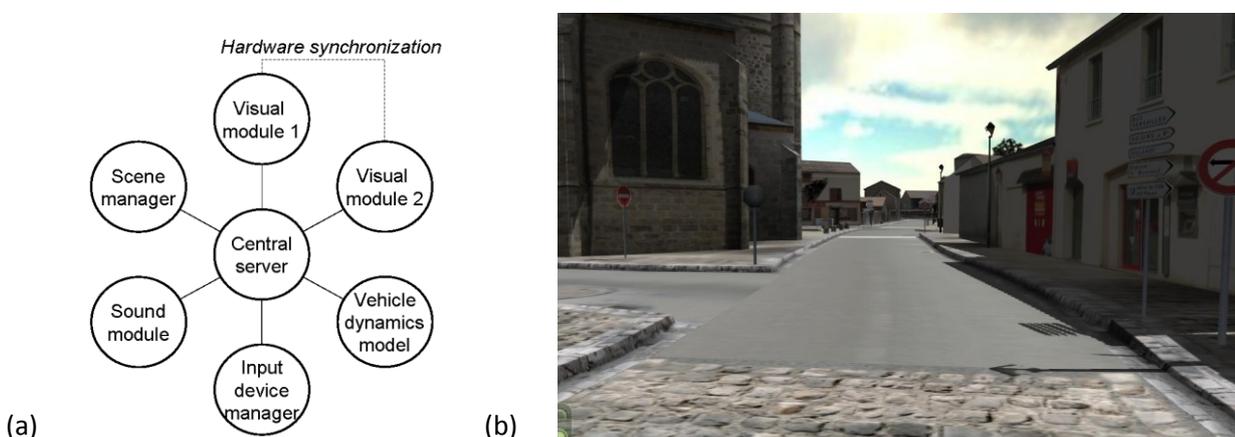


Figure 48 – openSimulation, d'après (Filliard, et al. 2010).

(a) Organisation générale des modules.

(b) Vue virtuelle de Guyancourt, rendue avec le module visuel d'openSimulation.

4.3.4. Stratégies de commande

La stratégie de commande est la partie du logiciel de simulation permettant de piloter les déplacements physiques du simulateur. Ces déplacements physiques étant bridés par l'architecture mécanique (position, vitesses, accélérations... maximales atteignables), elle doit réaliser un compromis entre optimiser la restitution des accélérations et maintenir le simulateur dans ses limites physiques. La littérature fournit un grand nombre de stratégies

de commande différentes, et le *motion cueing* est encore actuellement un sujet ouvert de recherche. Nous proposons ici un rapide aperçu des principales stratégies de commande employées ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Stratégie classique

La stratégie dite *classique* est la première stratégie de commande à avoir été développée et utilisée en simulation. Elle a initialement été développée par (Schmidt et Conrad 1970) pour de la simulation de vol à la NASA, puis modifiée par la suite par (Sinacori 1973) puis (Reid et Nahon 1985). Elle constitue le point de départ de la plupart des autres stratégies de commande. Très utilisés dans les simulateurs commerciaux pour la simplicité de sa mise en œuvre, elle propose d'effectuer une décomposition fréquentielle des accélérations du véhicule simulé.

Les accélérations linéaires et angulaires du véhicule simulé sont filtrées par un filtre passe-haut du 3ème ordre permettant à la fois de maintenir le simulateur dans ses limites et de ramener le système mobile dans sa position neutre (*washout*). Un filtre "anti-backlash" peut également être ajouté pour réduire des artéfacts induits par le filtrage passe-haut (Reymond et Kemeny 2000). Les accélérations soutenues longitudinales et latérales (calculées par filtrage passe-bas) sont restituées par *tilt coordination*. La Figure 49 illustre cette stratégie pour le cas des mouvements longitudinaux et des rotations de tangage.

La stratégie « classique » est plutôt simple à mettre en œuvre. Cependant, le réglage de ses paramètres peut se révéler long et fastidieux car effectué par essais/erreurs. De plus, l'utilisateur n'a aucune garantie quant au fait que la trajectoire du simulateur n'excède pas les limites physiques. C'est pourquoi le réglage des paramètres est généralement fait en considérant un cas « au pire » en termes d'amplitudes et durées d'accélération.

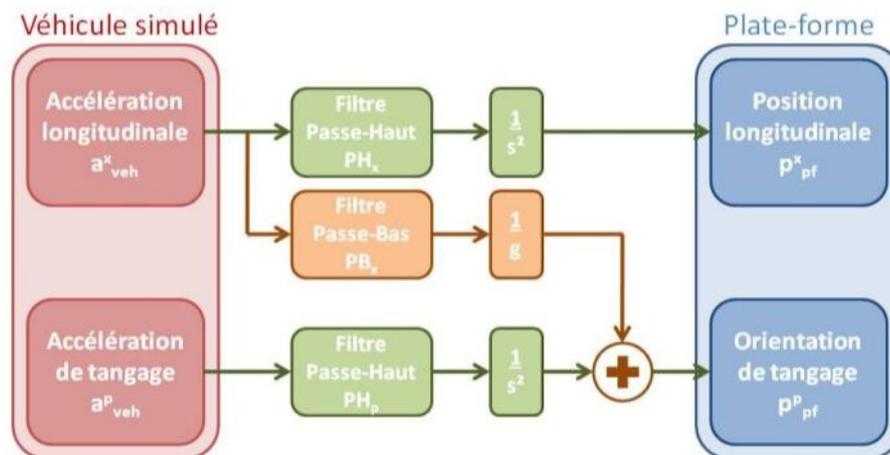


Figure 49 – Structure de la stratégie de commande classique pour le cas des accélérations longitudinale et de tangage. Cette structure est généralisable aux autres axes.

Seules les accélérations transitoires (haute-fréquence) sont restituées directement. Les accélérations soutenues (basse fréquence) sont restituées par tilt coordination.

Stratégie adaptative

Pour tenter d'améliorer la stratégie classique, et notamment le réglage des paramètres, (Parrish, Dieudonne et Martin 1975) ont proposé la stratégie dite *adaptative*, dont le développement fut poursuivi plus tard par (Reid et Nahon 1988). Sa structure est

basée sur celle de l'approche classique. La différence se situe au niveau des paramètres (α) des filtres qui ne sont dorénavant plus constants au cours de la simulation. Ils sont recalculés à chaque pas de temps de sorte à minimiser une fonction de coût $J(\alpha)$ définie par :

$$J(\alpha) = [A_{veh} - A_{pf}]^2 + \omega_1 [V_{pf}]^2 + \omega_2 [P_{pf}]^2$$

Le premier terme $[A_{veh} - A_{pf}]$ correspond à l'écart entre l'accélération du véhicule simulé A_{veh} et l'accélération de la plate-forme A_{pf} calculée par l'algorithme. Les deux autres termes $\omega_1 [V_{pf}]^2$ et $\omega_2 [P_{pf}]^2$ faisant intervenir la vitesse de la plate-forme V_{pf} et sa position P_{pf} servent à limiter les déplacements de la plate-forme et à la ramener dans sa position neutre. Les deux coefficients pondérateurs ω_1 et ω_2 permettent à l'utilisateur de régler le compromis entre la fidélité de la restitution et le respect des limites physiques.

On obtient donc une stratégie non linéaire augmentant la fidélité de la restitution des accélérations autour de la position neutre par rapport à la stratégie classique. Cependant, il y a toujours des paramètres à régler (ω_1 et ω_2), tâche s'effectuant toujours par essais / erreurs et n'étant pas évidente pour des utilisateurs non expérimentés. D'autre part, l'utilisateur n'est toujours pas assuré de ne pas dépasser les limites physiques.

Stratégie optimale

Au lieu de minimiser un coût instantané (comme dans la stratégie adaptative), (Sivan, Ish-Shalom et Huang 1982) proposent avec l'approche *optimale* de minimiser un coût global. Cette stratégie a été développée plus tard par (Reid et Nahon 1985) et modifiée encore plus récemment par (Telban et Cardullo 2002) pour de la simulation de vol.

Le principe consiste à déterminer « hors-ligne » (avant la simulation) pour une entrée donnée, un modèle de perception donné et sur une simulation de durée infinie, le filtre optimal qui minimise l'écart d'accélération perçue \hat{e} (Figure 50) tout en maintenant le simulateur dans ses limites. L'écart \hat{e} correspond à la différence entre l'accélération perçue dans le simulateur \hat{a}_{pf} et l'accélération qui aurait été perçue en conditions réelles \hat{a}_{veh} . La trajectoire utilisée en entrée est généralement un bruit blanc.

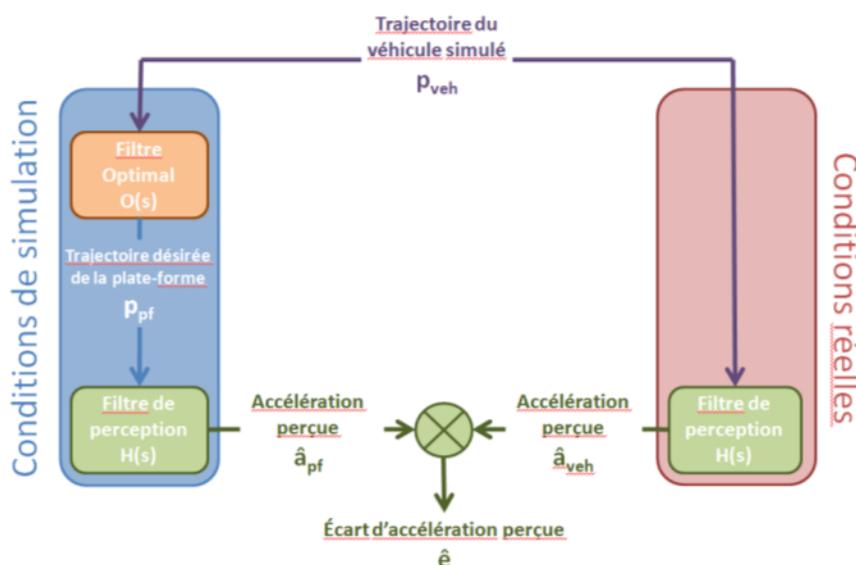


Figure 50 – Structure de la stratégie de commande optimale.

Pour une trajectoire donnée et un modèle de perception donné, on minimise « hors-ligne » l'écart d'accélération perçue sur une durée de simulation infinie afin d'obtenir le filtre « optimal ».

Cette méthode utilise donc un modèle de perception humaine pour calculer les accélérations perçues. Mais ce modèle de perception n'est pas exact, car notre compréhension des mécanismes de perception du mouvement est actuellement incomplète. De plus, on retrouve un des inconvénients des stratégies classique et adaptative : les limites physiques ne sont pas explicitement prises en compte. Donc on doit à nouveau déterminer le filtre optimal pour une trajectoire en entrée considérée comme le cas « au pire ». Dans ces conditions, l'utilisateur n'est une fois de plus pas assuré de ne pas dépasser les limites physiques de son simulateur.

Stratégie prédictive

Pour surmonter les problématiques soulevées par les 3 précédentes stratégies de commande, (Dagdelen 2005) propose une nouvelle approche : la stratégie *prédictive* (Figure 51), basée sur la technique MPC (*Model-based Predictive Control*). Cet algorithme prend explicitement en compte :

- un modèle de perception humaine ;
- les contraintes physiques du simulateur ;
- un modèle dynamique de la plate-forme.

Cette approche non-linéaire calcule à chaque pas de temps la consigne de trajectoire à fournir à la plate-forme de sorte à :

- minimiser l'écart d'accélération perçue en utilisant le modèle de perception humaine ;
- maintenir le simulateur dans ses limites (en termes de position, vitesse, accélération) en utilisant explicitement ses contraintes physiques.

De plus :

- la trajectoire calculée n'est appliquée que si le simulateur peut être stoppé avec une décélération imperceptible (en dessous du seuil de perception) avant d'atteindre les limites en position ;
- un autre algorithme de retour en position neutre (*washout*) est utilisé pour ramener la plate-forme en position neutre lorsqu'elle atteint une position limite.

Cette approche, en prenant en compte explicitement un modèle de perception et les limites physiques, permet de garantir une meilleure utilisation de l'espace de travail tout en minimisant les conflits sensoriels. De plus, l'utilisateur est cette fois assuré de ne pas envoyer de commande excédant les limites physiques. Ces résultats ont été testés et validés sur le simulateur ULTIMATE de Renault (Dagdelen, Reymond, et al. 2004). Cependant, il n'a pas encore été implémenté sur d'autres simulateurs.

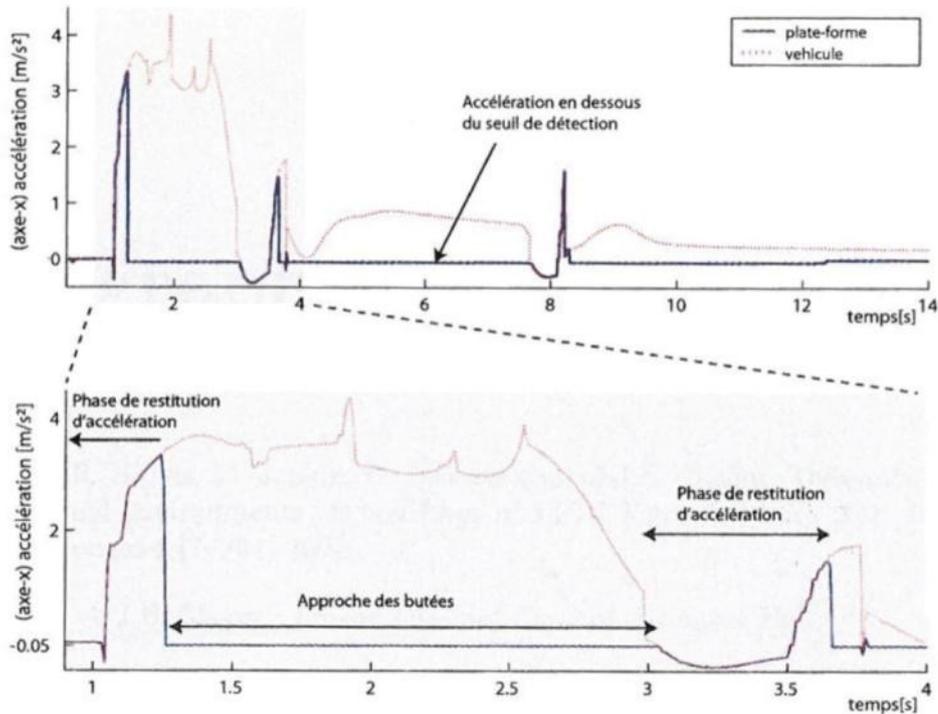


Figure 51 – Stratégie adaptative, d’après (Dagdelen 2005).

Le profil d’accélération du véhicule correspond à l’accélération longitudinale au démarrage. La consigne d’accélération rectiligne est calculée par la stratégie prédictive en considérant les limites du rail longitudinal d’ULTIMATE.

4.3.5. Synthèse d’image

Pour restituer visuellement l’environnement virtuel, la simulation de conduite, comme toute application de réalité virtuelle, utilise les techniques de synthèse d’image. Le but est de transformer la modélisation vectorielle (3 dimensions) du monde en une représentation matricielle (2 dimensions) qui sera affichée sur l’interface visuelle du simulateur. Ce passage d’une représentation en 3 dimensions à une représentation en 2 dimensions est fait pour un point de vue donné⁵. Il faut donc, afin que l’image soit géométriquement correcte, que l’observateur soit placé à la bonne distance et selon la bonne direction par rapport à l’interface visuelle. En réalité virtuelle, cette adéquation entre les points de vue est souvent abordée dans le sens inverse : on connaît la position de l’observateur par rapport à l’écran (via un capteur de localisation) et on calcule l’image à afficher en fonction de ces paramètres.

Pour calculer une image en informatique graphique, on utilise une caméra virtuelle dont le principe est celui du sténopé (Figure 52), principe approchant le fonctionnement de l’œil. La caméra sténopé (*pinhole camera*) fonctionne par projection conique de l’environnement 3D sur un plan de référence. Le sommet de cette projection conique correspond au point de vue de référence.

⁵ Notons que l’existence d’un point de vue de référence est toujours vraie pour une vue perspective conique. Il n’y a que dans le cas d’une vue en perspective axonométrique (comme par exemple la perspective cavalière ou les projections orthogonales) qu’il n’existe pas de point de vue de référence. Cependant, les perspectives axonométriques ne sont pas utilisées en réalité virtuelle.

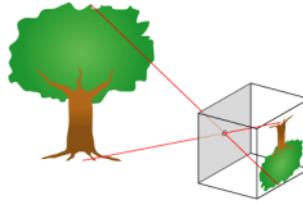


Figure 52 - Modèle du sténopé (source : Wikimedia Commons)

En réalité virtuelle, on définit généralement une caméra par son point de vue de référence et son plan de référence. Si on définit le plan de référence de façon à le faire coïncider avec l'écran de l'interface visuelle, il est alors aisé de faire uniquement déplacer le point de vue de référence de la caméra de la même manière que l'observateur par rapport à l'écran réel. On obtient alors une caméra dite asymétrique, comme l'illustre la Figure 53.

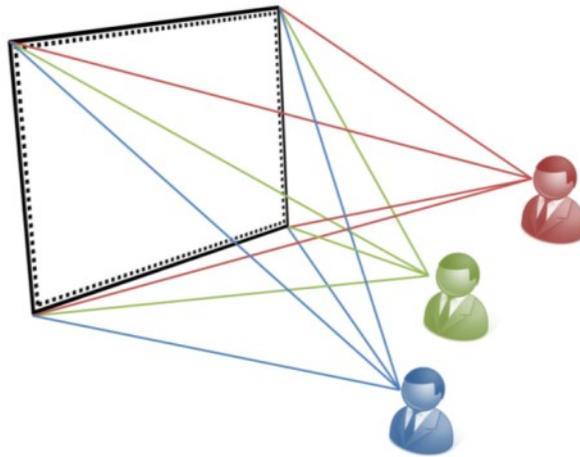


Figure 53 – Illustration du concept de caméra asymétrique en réalité virtuelle.

Si on fait coïncider le plan de référence de la caméra (rectangle en traits pointillés) avec l'écran réel (rectangle en traits pleins), il suffit alors de déplacer le point de vue de référence de la caméra de la même manière que l'observateur par rapport à l'écran réel, pour que l'image reste géométriquement correcte.

Il existe plusieurs méthodes pour effectuer la projection faite par la caméra et obtenir l'image matricielle en 2D qui sera affichée. La méthode de lancer de rayons et la méthode de radiosité sont les méthodes permettant de faire la synthèse d'image la plus réaliste. Grâce à elles on est aujourd'hui capables d'obtenir des images qu'on qualifie de « confondantes ». Ce sont ces méthodes qui sont utilisées par le cinéma pour la réalisation des effets spéciaux numériques ou des films d'animation. Cependant, le temps de calcul pour une image est encore trop long aujourd'hui pour pouvoir être fait en temps réel. La simulation de conduite, le jeu vidéo ou toute autre application informatique temps réel utilise la méthode de la rastérisation.

La rastérisation est effectuée par le processeur de traitement graphique (*Graphics Processing Unit GPU*) et se déroule en 2 grandes étapes. Premièrement, la représentation vectorielle de l'environnement est projetée sur le plan de référence de la caméra. On obtient alors une représentation vectorielle en 2 dimensions. Cette représentation vectorielle subit ensuite une succession d'opérations (décrites dans la Figure 54) pour obtenir la représentation matricielle finale.

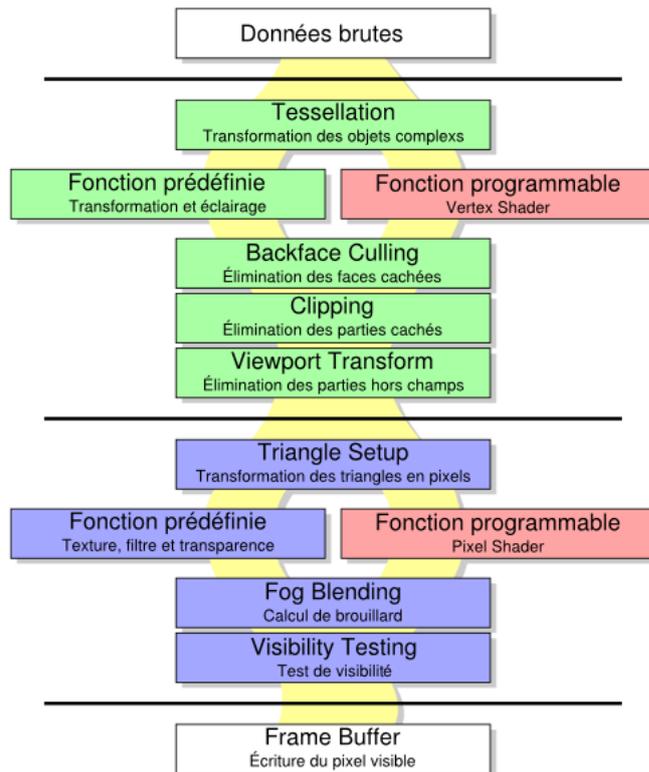


Figure 54 – Pipeline graphique du processeur de traitement graphique (Graphics Processing Unit GPU) de la carte graphique (source : Wikimedia Commons).

Les données brutes correspondent à la représentation vectorielle de l'environnement virtuel projeté sur le plan de référence de la caméra. Cette représentation vectorielle est ensuite transformée pour obtenir la représentation matricielle qui sera affichée sur l'interface visuelle.

Cette deuxième étape, permettant de passer de la représentation vectorielle en deux dimensions à la représentation matricielle intègre notamment des procédés permettant :

- d'améliorer l'aspect final de l'image, comme l'antialiasing ou *antialiasing* par exemple ;
- d'accélérer le calcul, comme les techniques de *backface culling* ou de *clipping* par exemple ;

On voit également dans la Figure 54 que le processus de rasterisation intègre des fonctions programmables : les *shaders*. Grâce à eux, les programmeurs peuvent avoir accès au traitement réalisé par les cartes graphiques, ce qui permet de réaliser des fonctions personnalisées sans surcharger le processeur central (*Central Processing Unit CPU*). De plus, en réalisant ces fonctions sur le *GPU* au lieu du *CPU*, le temps d'exécution est inférieur du fait qu'on ne sort pas du pipeline graphique de rasterisation.

Les *shaders* permettent de faire des effets variés. Par exemple, la technique de *bump mapping* permet grâce aux *shaders* d'obtenir une image d'une surface apparemment complexe à partir d'une surface simple et d'une texture (Figure 55). La technique de *cell-shading* (ou *toon shading*) permet quant à elle d'obtenir un rendu type « dessin animé », ou « *cartoon* » (Figure 56). Nous verrons dans le Chapitre 6 (6.3) comment les *shaders* ont été utilisés sur le simulateur SAAM pour la correction d'image.

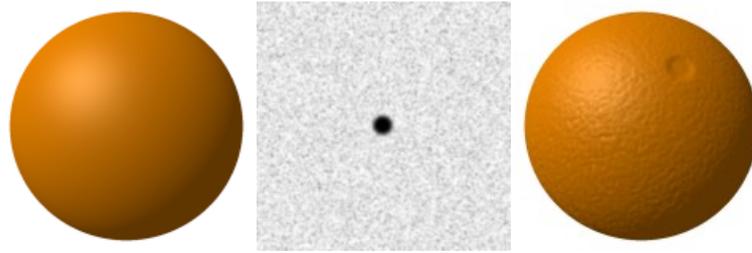


Figure 55 – Technique de bump mapping utilisant des shaders (source : Wikimedia Commons). La géométrie utilisée est une sphère (image de gauche). Après la passe de bump mapping avec une texture indiquant le niveau de relief (image du centre), on obtient le rendu final de l'image de droite.

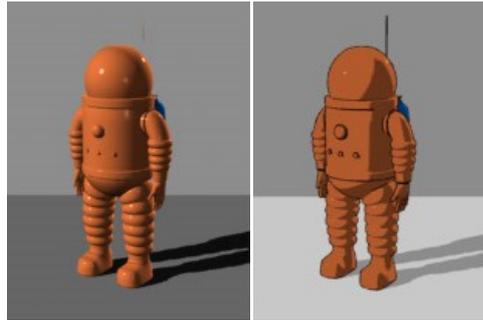


Figure 56 – Technique de cell-shading ou toon-shading (source : Wikimedia Commons). L'image de gauche présente un rendu conventionnel. L'image de droite présente un rendu de la même géométrie avec la technique de cell-shading. Les contours sont plus marqués et la palette de couleurs est réduite.

Conclusions de l'étude bibliographique et problématique

La perception du mouvement est un mécanisme complexe, résultant de l'interaction entre plusieurs modalités sensorielles aux propriétés et fonctions différentes.

- *Le système visuel, organe principal de la perception du mouvement, renvoie des informations sur la direction et la vitesse du déplacement, grâce principalement au flux optique.*
- *Le système auditif, dans le cas de la conduite automobile, renvoie également des informations sur la vitesse, en fournissant des informations sur le bruit créé par le groupe motopropulseur, sur les bruits aérodynamiques et sur les bruits de roulement (contact pneu/route).*
- *Le système vestibulaire, centrale inertielle du corps humain, renvoie quant à lui des informations sur les accélérations linéaires et rotatives de la tête. Ces informations permettent au cerveau de calculer et d'anticiper le mouvement à venir, afin de pouvoir réagir au plus vite en cas de besoin.*
- *Le corps humain possède aussi des capteurs somatosensoriels venant renforcer les informations d'accélération du système vestibulaire. Il peut s'agir par exemple de capteurs de pression de la peau situés dans le dos et sur la poitrine, au contact avec le siège et la ceinture ; ou encore d'organes situés dans les tendons et les muscles, renvoyant des informations sur l'effort des bras pour le maintien du volant, ou des muscles du cou pour le maintien de la tête.*

Tous ces organes contribuent à la création d'une sensation de mouvement unique et cohérente. Bien que ces modalités sensorielles puissent être suffisantes à elles seules pour susciter une sensation de mouvement, la littérature fournit de nombreuses preuves des interactions qui peuvent exister entre elles. En outre, lorsqu'il existe des conflits entre ces différentes modalités, la cinétose (plus connue sous le nom de mal du simulateur) peut apparaître.

Afin de pouvoir faire conduire un conducteur réel dans un environnement de conduite virtuel, les simulateurs de conduite stimulent les différents organes participant à la perception du mouvement. Le conducteur, installé dans un cockpit (partiel ou complet), peut interagir avec le véhicule virtuel avec le volant et les pédales, et visualise l'environnement sur un écran ou un visiocasque. Le son provenant du véhicule simulé et de l'environnement est restitué au moyen d'enceintes, généralement situées dans le cockpit. Certains simulateurs, dits dynamiques, proposent également une restitution des accélérations et des vibrations, au moyen d'actionneurs électromécaniques, pneumatiques ou hydrauliques.

Si certains simulateurs avancés permettent une restitution sur toutes les modalités sensorielles liées à la perception du mouvement, ce n'est pas le cas de tous, notamment les simulateurs à faible ou moyen coût. Sur ces simulateurs, l'absence de restitutions sur une ou plusieurs modalités, ou encore la fidélité relativement faible de la restitution, peut entraîner,

en plus de la cinétose, une différence entre le mouvement perçu sur simulateur et le mouvement qui serait perçu en conditions réelles. Notamment, il est souvent reporté une sous-estimation de la vitesse, qui se traduit généralement par une conduite plus rapide.

Cette sous-estimation de la vitesse perçue peut être gênante, notamment si elle implique que le conducteur roule plus vite qu'en conditions réelles. En effet, le conducteur s'attend alors à ce que son véhicule réagisse comme si il roulait à la vitesse qu'il perçoit. Or son véhicule a une vitesse plus élevée, et donc réagira différemment, particulièrement en virage ou en cas de freinage d'urgence.

Pour tenter de « corriger » ce problème de vitesse perçue sur leur simulateur, (Diels et Parkes 2009) proposent une méthode basée sur des résultats préliminaires de (Mourant, et al. 2007), consistant à modifier le champ de vision géométrique. Nous avons choisi d'étudier de façon plus approfondie cette technique. Notamment, nous allons tenter de répondre aux questions suivantes :

- *Quel est l'impact de cette technique sur la perception de la vitesse ? Peut-on le quantifier ?*
- *Comment utiliser au mieux cette technique sur un simulateur ?*
- *Est-ce possible de l'implémenter sur tous les simulateurs ?*

Chapitre 5 Comment « corriger » la vitesse perçue ?

Nous avons vu que la perception de la vitesse est une action multisensorielle provenant principalement de la modalité visuelle, mais aussi des modalités proprioceptive, auditive et inertielle (Berthoz 1995) (Kemeny et Panerai 2003). Pour beaucoup de systèmes de réalité virtuelle et de simulateurs, une sous-estimation de la vitesse perçue peut exister (Banton, et al. 2005) (Blaauw 1982), se traduisant bien souvent en une conduite plus rapide du conducteur. Cette sous-estimation de la vitesse peut avoir plusieurs causes : champ de vision couvert insuffisant, base de données pauvre en détails, restitutions sonores et/ou proprioceptive insuffisantes... Ces aspects ne peuvent pas toujours être améliorés car les modifications nécessaires peuvent être coûteuses.

5.1. Modification de la vitesse perçue par modification du champ de vision géométrique

5.1.1. Preuves expérimentales

Pour tenter de modifier la vitesse perçue dans leur simulateur, qu'ils jugeaient trop faibles par rapport à la vitesse du véhicule simulé, (Diels et Parkes 2009) proposent⁶ une technique (Figure 57) consistant à modifier le champ de vision géométrique (*Geometric Field Of View GFOV*) tout en gardant le même champ de vision (*Field Of View FOV*). Le GFOV correspond au champ de vision de la caméra virtuelle utilisée par le logiciel de simulation pour calculer l'image à afficher. Le FOV, quant à lui, est le champ de vision du conducteur réellement couvert par l'écran. En conditions « standard », le GFOV est identique au FOV (la caméra virtuelle coïncide avec la position de l'observateur, voir 4.3.5), afin de procurer une image géométriquement correcte.

La technique proposée par (Diels et Parkes 2009) consiste à déplacer le point de vue virtuel du conducteur, comme si le conducteur se déplaçait par rapport à l'écran (Figure 57). Lorsque le point de vue est rapproché de l'écran, le champ de vision géométrique augmente ; à l'inverse, lorsqu'il est éloigné de l'écran, le champ de vision géométrique diminue. De plus, comme la taille de l'écran ainsi que la position du conducteur par rapport à celui-ci peuvent varier d'un simulateur à l'autre, les auteurs proposent d'utiliser le ratio

⁶ Notons que cette technique de modification du champ de vision géométrique est utilisée depuis plus longtemps dans des simulateurs où le champ de vision couvert est faible (Mourant, et al. 2007). Les utilisateurs de ces simulateurs utilisent donc cette technique pour augmenter virtuellement le champ de vision pour que le conducteur ait une meilleure appréhension de l'environnement virtuel dans lequel il se trouve. Toutefois, l'étude de l'impact sur la vitesse perçue lors de l'utilisation de cette technique est récente et n'a été que très peu investie.

GFOV/FOV comme valeur d'entrée de la technique. Nous proposons d'appeler ce ratio le facteur d'échelle visuelle f_{EV} .

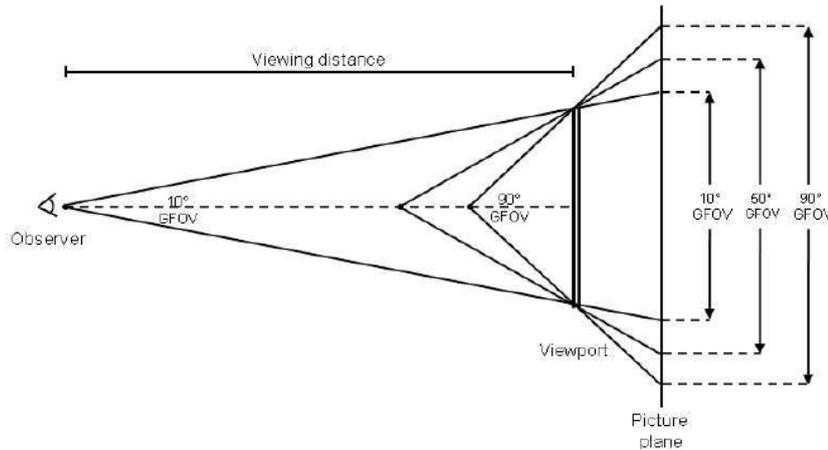


Figure 57 – Modification du champ de vision géométrique (GFOV) en déplaçant le point de vue virtuel de l'observateur, selon (Diels et Parkes 2009)

La Figure 58 aide à mieux comprendre ce que représente ce facteur d'échelle à travers une représentation en 2 dimensions. L'écran virtuel est défini par rapport au véhicule virtuel de sorte à être à la même position que l'écran réel par rapport au cockpit du simulateur. Si le point de vue virtuel est placé à la même position par rapport à l'écran virtuel que le point de vue réel par rapport à l'écran réel, alors le GFOV et le FOV sont identiques. On a $GFOV = FOV = \widehat{M_1 O M_2}$: le f_{EV} est égal à 1.00. Si le point de vue virtuel est avancé, par exemple au point A, le GFOV vaut alors $\widehat{M_1 A M_2}$. Le FOV reste le même car le conducteur ne se déplace pas, on a donc un f_{EV} supérieur à 1.00. Si le point de vue virtuel est reculé, par exemple au point B, on obtient alors un f_{EV} inférieur à 1.00.

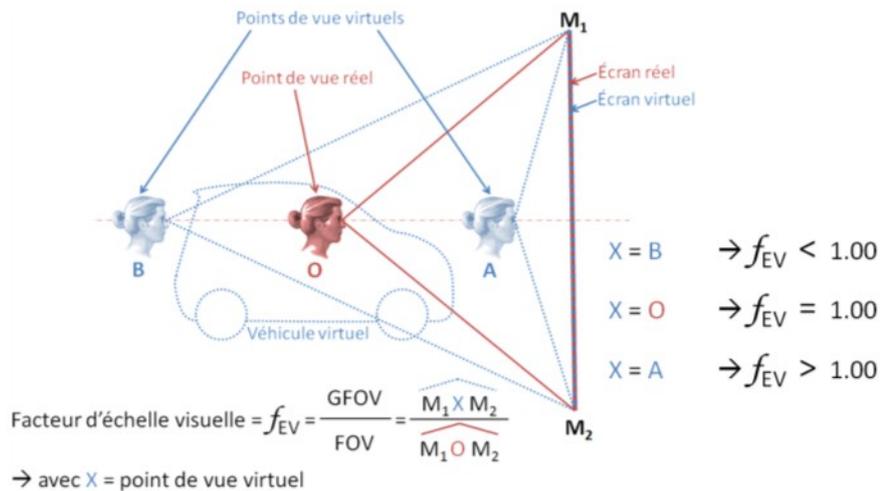


Figure 58 – Définition du facteur d'échelle visuelle f_{EV} .

Dans les études de (Diels et Parkes 2009) et de (Mourant, et al. 2007), la tâche demandée aux sujets était de produire sur simulateur des vitesses données en ayant le compteur caché. Les auteurs comparent alors les vitesses produites avec les vitesses consignées, en fonction du GFOV utilisé. Dans les 2 expérimentations, des résultats similaires sont obtenus : lorsque le champ de vision géométrique augmente, la vitesse perçue semble augmenter elle aussi. Cela se traduit au niveau du comportement du conducteur par une diminution de la vitesse produite.

Dans l'expérimentation de (Mourant, et al. 2007), les auteurs comparent deux conditions de flux optique : avec ou sans arbres au bord de la route. Ils utilisent un simulateur statique avec un écran couvrant 45° de champ de vision horizontal. Les GFOV utilisés sont de 25° (f_{EV} de 0,556), 55° (f_{EV} de 1,222) et 85° (f_{EV} de 1,889). Les vitesses consignes sont de 30 et 60 miles/heure, soit environ 48 et 96 km/h. Dans l'expérimentation de (Diels et Parkes 2009), les auteurs utilisent un simulateur avec restitution des vibrations et un système visuel à 3 écrans couvrant 210° du champ de vision horizontal. Ils utilisent 4 vitesses consignes : 20, 30, 50 et 70 miles/heure, soit environ 32, 48, 80 et 113 km/h. Ils comparent 4 f_{EV} différents : 0.83, 1.00, 1.17 et 1.33.

Les résultats obtenus par ces 2 études sont présentés dans la Figure 59. On y voit les vitesses moyennes produites pour chaque vitesse consigne par les sujets. Selon les auteurs, la diminution de la vitesse produite lorsque le GFOV augmente s'explique par une augmentation de la vitesse perçue. Cette diminution de la vitesse produite est obtenue quelle que soit la vitesse consigne.

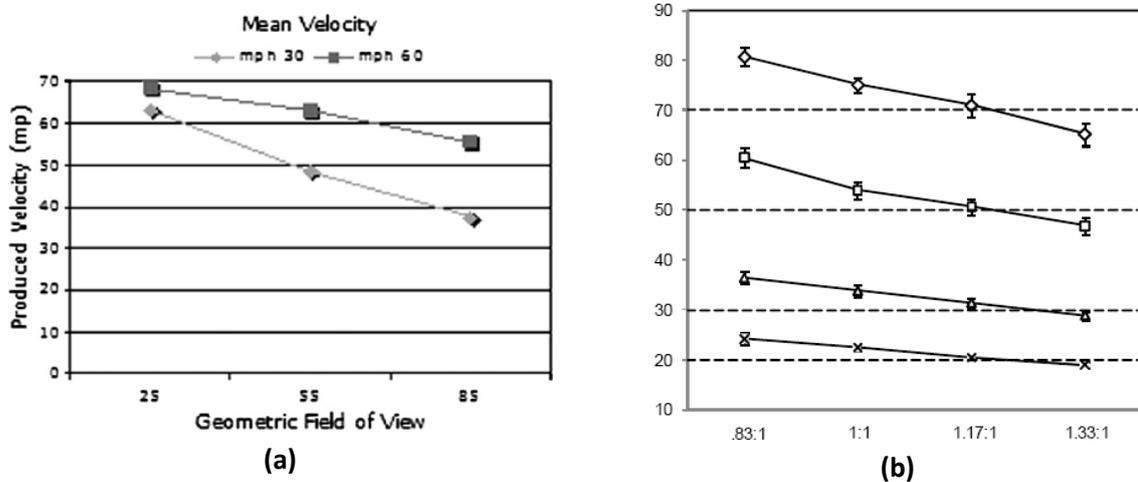


Figure 59 - Influence du champ de vision géométrique sur la vitesse produite

(a) Résultats de (Mourant, et al. 2007). Pour chaque vitesse consigne (30 et 60 miles/h), les vitesses moyennes produites par les conducteurs en fonction du GFOV. Note : le champ de vision du simulateur est de 45° . Les ratios GFOV/FOV correspondant sont donc de 0.556, 1.222 et 1.889.

(b) Résultats de (Diels et Parkes 2009). Pour chaque vitesse consigne (20, 30, 50, et 70 miles/h), les vitesses moyennes produites par les conducteurs en fonction du ratio GFOV/FOV. Note : le champ de vision du simulateur est de 210° .

Toutefois, comme la tâche demandée aux conducteurs dans les expérimentations de (Mourant, et al. 2007) et (Diels et Parkes 2009) est de produire des vitesses, un biais est introduit. En effet, le véhicule simulé est différent du véhicule qu'ils conduisent régulièrement. Ainsi, même avec la phase d'entraînement avant l'expérimentation pour se familiariser avec le simulateur, il est fort probable que lorsqu'on leur demande d'atteindre une certaine vitesse, ils se basent sur leurs souvenirs de conduite réelle plutôt que sur les quelques minutes de la phase d'apprentissage. Or, la sensation de vitesse varie d'une voiture à l'autre : on sait par exemple que la hauteur du point de vue influe sur la perception de la vitesse (Panerai, et al. 2001). Ainsi rouler à la même vitesse dans un poids lourd, une voiture ou un kart ne procure pas la même sensation de vitesse. Ce biais est d'autant plus renforcé que les participants connaissent la valeur de la vitesse consigne. Lorsqu'on leur demandera de produire cette vitesse, ils tenteront donc de reproduire la sensation de vitesse correspondant à cette valeur en fonction de leur passif de conduite.

D'autre part, les simulateurs utilisés étaient soit statique pour (Mourant, et al. 2007), soit restituant uniquement les vibrations pour (Diels et Parkes 2009). Même si les restitutions inertielles ne procurent des informations que sur l'accélération du véhicule et non directement sur sa vitesse, elles peuvent néanmoins aider le conducteur à atteindre la vitesse consigne, pendant la phase d'accélération initiale par exemple.

Un des autres résultats de ces 2 expérimentations est que le conducteur ne détecte pas l'existence des différentes conditions visuelles : dans les 2 études, tous les conducteurs répondent ne pas avoir perçu de différence visuelle. Ainsi cette technique de changement de GFOV (ou de changement de point de vue virtuel) permet de modifier subtilement la perception de la vitesse. La sensation de présence du conducteur n'est donc pas altérée, ce qui permet de ne pas modifier son comportement. Ce résultat n'est pas cependant pas validé par des questionnaires de présence.

5.1.2. Hypothèse explicative

Aussi bien (Mourant, et al. 2007) que (Diels et Parkes 2009) ne fournissent pas d'explication quant au changement de vitesse perçue induit par le facteur d'échelle visuelle. L'explication que nous proposons est que la modification du point de vue virtuel modifie le flux optique sur l'écran. Comme le conducteur est immobile par rapport à l'écran du simulateur, il perçoit ce changement de flux optique. Ce ne serait pas le cas si le point de vue réel et le point de vue virtuel restaient confondus. La Figure 60 montre pour un vecteur vitesse le changement induit par le déplacement du point de vue.

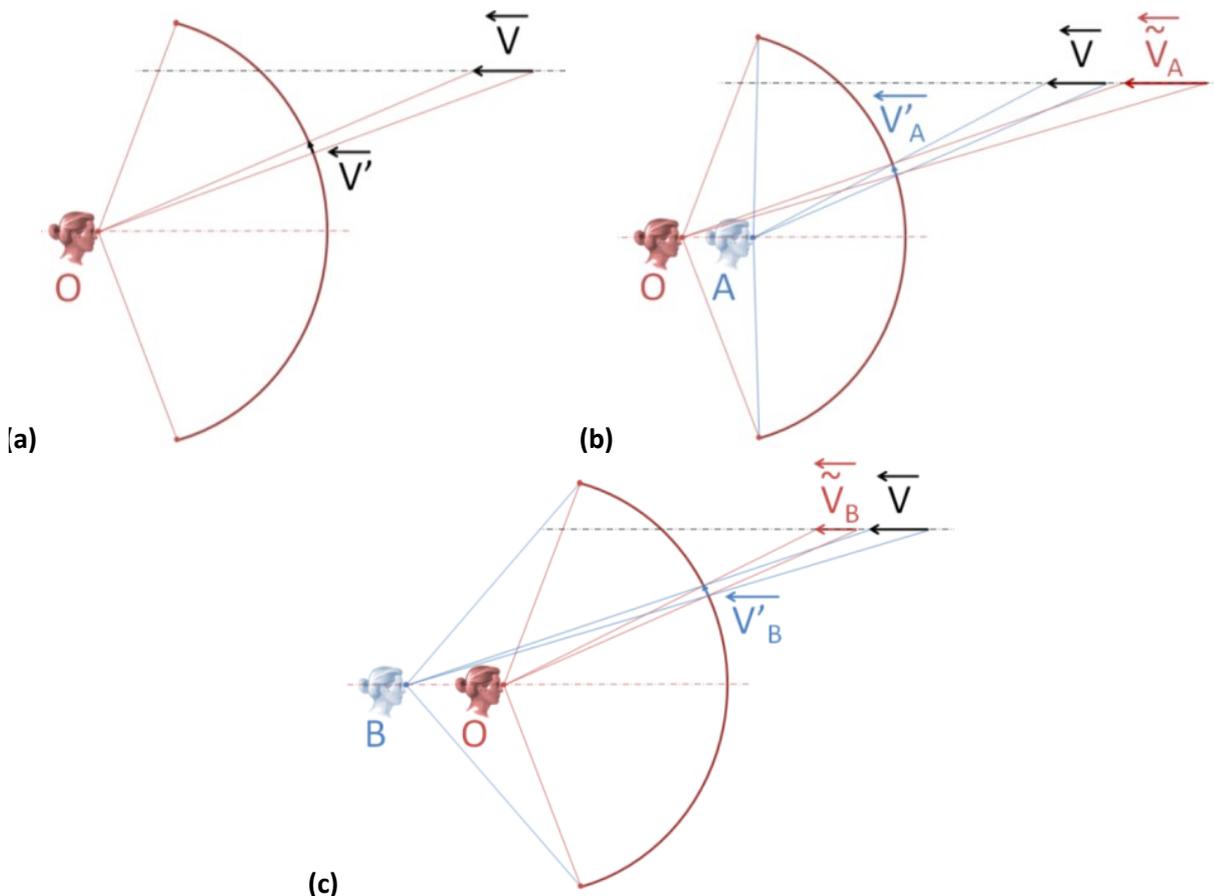


Figure 60 – Changement induit par le changement de point de vue virtuel sur un vecteur vitesse.

- La Figure 60(a) montre la situation « standard » : le point de vue virtuel est confondu avec le point de vue réel en O. Le vecteur \vec{V} se projette sur l'écran en \vec{V}' et est donc perçu de façon géométriquement correcte.
- En (b), on observe ce qui se passe si le point de vue virtuel est avancé en A. \vec{V} se projette alors en \vec{V}'_A , et comme le point de vue réel est toujours en O, le vecteur \vec{V} est alors perçu en \vec{V}_A , dont la norme est plus grande que celle de \vec{V} . Le flux optique est donc plus fort.
- De même, lorsqu'on recule le point de vue virtuel en B, \vec{V} se projette en \vec{V}'_B et est perçu par le conducteur (placé toujours en O) en \vec{V}_B , dont la norme est plus petite que celle de \vec{V} . Le flux optique est donc dans ce cas là plus faible.

La Figure 61 et la Figure 62 donnent un aperçu plus concret du changement induit par le facteur d'échelle visuelle sur le flux optique. Les deux figures présentent chacune un champ de vecteurs vitesses, sous plusieurs facteurs d'échelle visuelle différents. Dans les deux cas, il s'agit d'un déplacement radial : les vecteurs vitesses sont colinéaires à la direction du regard et disposés dans un plan perpendiculaire à la direction du regard dans la Figure 61 et dans un plan parallèle à la direction du regard dans la Figure 62 (comme une route par rapport au conducteur). On voit clairement que le flux optique s'intensifie (les vecteurs vitesses sont plus grands) lorsque le f_{EV} augmente, même si l'effet est moins visible dans la deuxième figure.

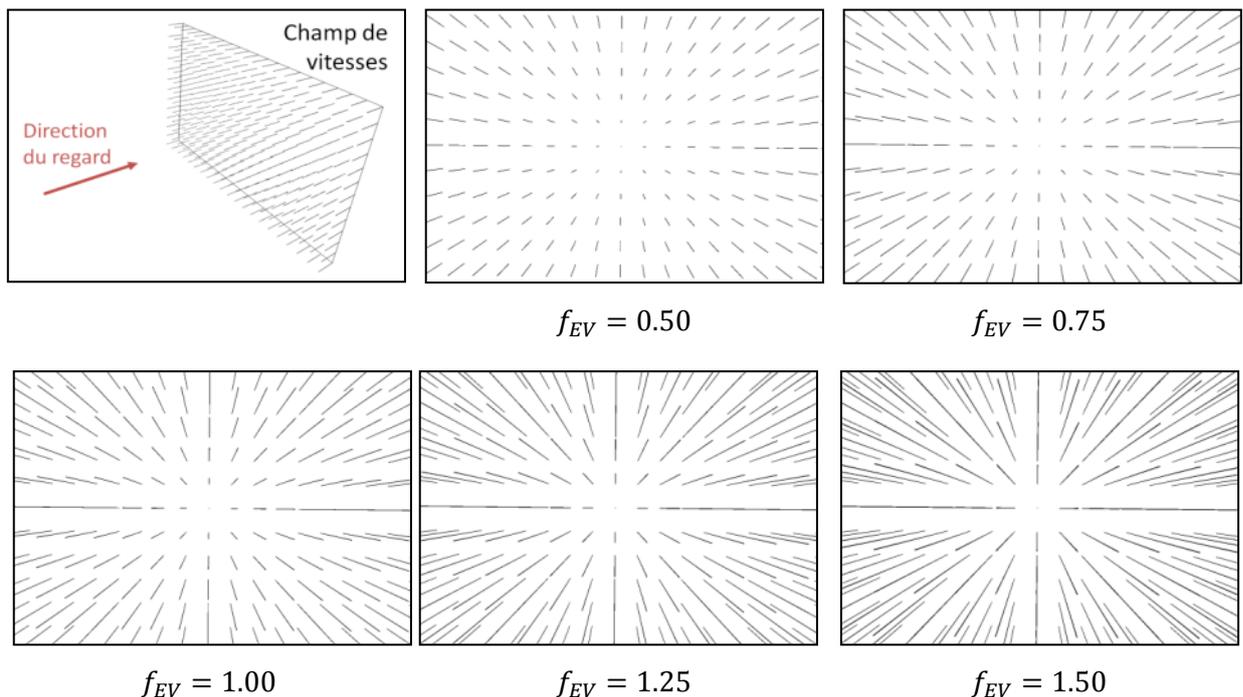


Figure 61 – Flux optiques correspondant au même champ de vitesses, obtenus avec des facteurs d'échelle visuelle (f_{EV}) différents.

Les vecteurs vitesses sont répartis sur un plan perpendiculaire à la direction du regard.

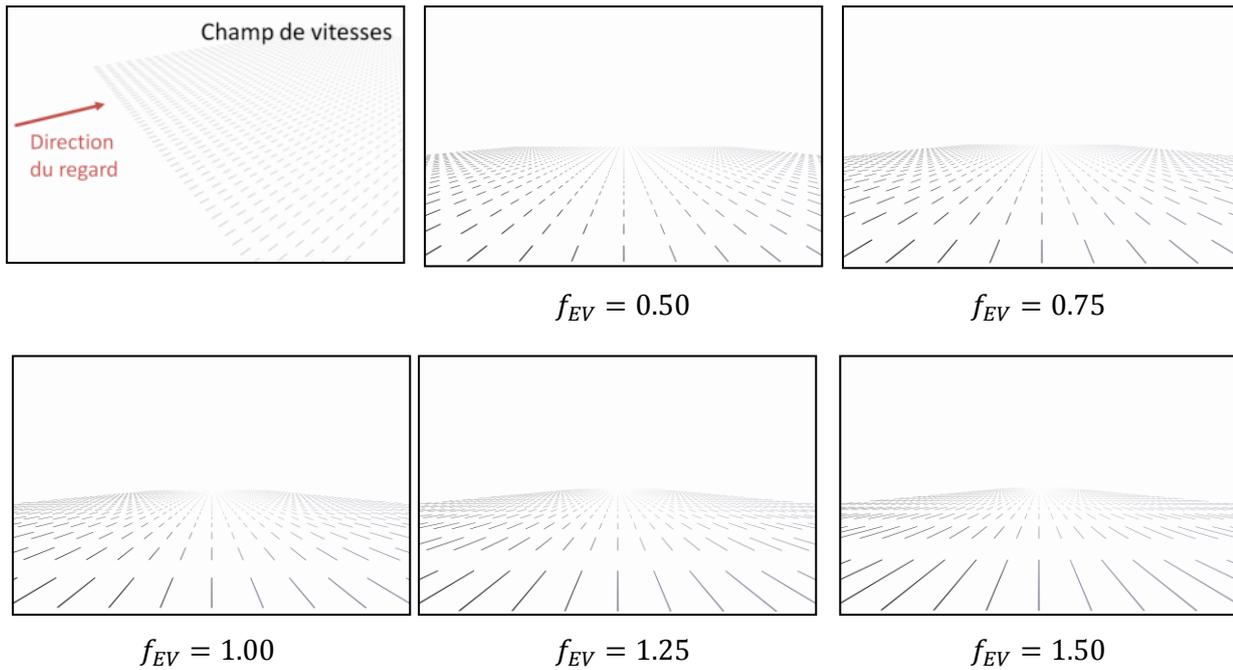


Figure 62 - Flux optiques correspondant au même champ de vitesses, obtenus avec des facteurs d'échelle visuelle (f_{EV}) différents.

Les vecteurs vitesses sont répartis sur un plan parallèle à la direction du regard, comme la route par rapport au conducteur.

5.1.3. Objectifs de l'étude proposée

La technique de modification du point de vue (ou du GFOV) est intéressante car elle semble permettre de modifier la vitesse perçue par le conducteur, tout en préservant sa sensation de présence dans l'environnement de conduite virtuel. Nous proposons ici de faire une étude expérimentale permettant de mesurer plus précisément l'impact de cette technique sur la vitesse perçue.

En condition « standard », le point de vue virtuel coïncide avec le point de vue réel du conducteur par rapport à l'écran, afin de procurer un flux optique géométriquement correct. Le f_{EV} est alors de 1.00. Si la vitesse perçue dans ces conditions est différente de la vitesse du véhicule simulé, un utilisateur de simulateur de conduite peut alors vouloir changer ce facteur d'échelle pour compenser cette différence. Le but de l'étude proposée est de déterminer une loi empirique permettant de déterminer le f_{EV} à utiliser en fonction de la différence de vitesse à compenser (différence entre vitesse perçue et vitesse du véhicule simulé).

- Nous allons essayer de supprimer le biais présent dans les expérimentations de (Mourant, et al. 2007) et (Diels et Parkes 2009), par rapport au passif de conduite du conducteur.
- Nous allons utiliser un simulateur de conduite dynamique : le simulateur SAAM proposant un champ de vision horizontal de 150°.

5.2. Le simulateur de conduite SAAM

Cette partie décrit le simulateur de conduite dynamique SAAM (Simulateur de conduite Automobile Arts et Métiers), basé à l'Institut Image Arts et Métiers ParisTech à Chalon-sur-Saône. Il a été conçu et réalisé dans le cadre de cette thèse (entre septembre 2007 et février 2010), et a été utilisé pour mener les études expérimentales présentées dans ce mémoire.

5.2.1. Présentation générale

Le simulateur SAAM a été conçu à des fins d'étude du comportement du conducteur en situation de conduite. Il est le fruit du partenariat entre Arts et Métiers ParisTech et le Centre Technique de Simulation de Renault, avec le soutien et le financement du Grand Chalon et du Fonds National d'Aménagement et de Développement du Territoire (FNADT).

La Figure 63 présente une vue générale du simulateur. Le conducteur se trouve dans un cockpit basé sur une Renault Twingo 2 de série qui a été allégée et instrumentée. Des systèmes à retour d'effort ont été rajoutés sur le volant et les pédales. La boîte de vitesses séquentielle 6 vitesses ainsi que les commandes au volant sont celles d'origine de la voiture. Un système d'interphonie permet au conducteur et à l'expérimentateur de communiquer.

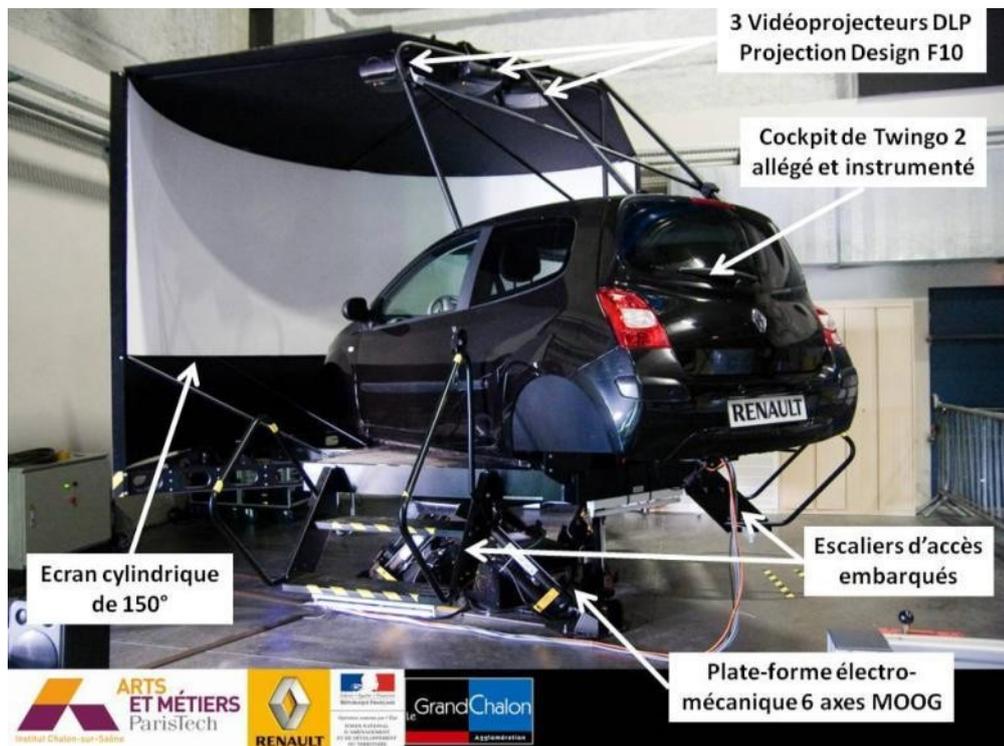


Figure 63 – Concept du simulateur de conduite SAAM (Simulateur de conduite Automobile Arts et Métiers). SAAM est un simulateur de conduite dynamique à 6 degrés de liberté à base fixe. Il est basé à l'Institut Image d'Arts et Métiers ParisTech à Chalon-sur-Saône, et a été construit en partenariat avec Renault, avec des subventionnements du FNADT et du Grand Chalon. Le cockpit est basé sur une Twingo 2 de série, allégée et instrumentée. La scène est projetée sur un écran cylindrique de 150° par 3 vidéoprojecteurs embarqués. Les escaliers d'accès sont embarqués.

Les mouvements du simulateur sont assurés par une plate-forme électromécanique MOOG de type Gough-Stewart à 6 degrés de liberté. Un châssis d'interface assure la liaison entre la table supérieure de cette plate-forme et le cockpit. Ce châssis d'interface supporte également l'écran cylindrique sur lequel est projetée la scène visuelle au moyen de 3 vidéoprojecteurs DLP Projection Design F10. Ces 3 vidéoprojecteurs sont maintenus par un portique fixé sur le toit du cockpit. Enfin, les 2 escaliers d'accès (conducteur et passager) sont embarqués. Ils sont fixés au châssis d'interface. Tout l'ensemble est mobile : seule la base de la plate-forme MOOG est fixée au sol.

Le simulateur utilise le logiciel de simulation SCANeR© II avec 4 PC : un PC « maître » sur lequel sont lancés tous les modules sauf les 3 modules de rendu visuel (1 par vidéoprojecteur) qui eux sont chacun lancés sur un des 3 PC « visuel ». Le Tableau 1 donne les caractéristiques techniques de ces PC.

	PC « Maître »	PC « Visuel »
Carte mère	Asus P5E	Asus P5E
Mémoire vive	4 Go (4 x 1 Go Crucial Ballistix)	4 Go (4 x 1 Go Crucial Ballistix)
Disque Dur	Western Digital Raptor 150 Go 10 000 tr/min	Western Digital Raptor 150 Go 10 000 tr/min
Processeur	Intel Core 2 Quad Q 6600 2,40 GHz	Intel Core 2 Duo E 6850 3,00 GHz
Carte graphique	NVidia Geforce 8400 GS	NVidia Geforce 8800 GTX

Tableau 1 – Caractéristiques techniques des PC utilisés pour le logiciel SCANeR© II sur le simulateur SAAM.

5.2.2. Le cockpit

Un important travail d'allègement a été effectué avec Renault (partenaire du projet) pour transformer la Twingo 2 de série en cockpit de simulateur. En effet, comme nous le verrons par la suite, la plate-forme MOOG servant à la restitution du mouvement sur le simulateur supporte une charge maximale d'une tonne. Or, la Twingo 2 de série atteint déjà ce poids. Pour que le simulateur puisse fonctionner dans des conditions optimales, il a fallu alléger au maximum le cockpit, car l'écran, le châssis, les escaliers et le conducteur doivent également pouvoir être déplacés. Toutefois, l'allègement ne devait pas avoir d'influence sur la rigidité de la voiture : le fait que le cockpit puisse se déformer sous l'effet des accélérations est inenvisageable.

La deuxième contrainte sur l'allègement du cockpit a été que l'intérieur ne soit pas modifié visuellement. Ainsi, le conducteur a visuellement l'impression de s'installer au volant d'une voiture réelle. Le biais cognitif ainsi créé est favorable à la qualité de l'immersion. On peut alors parler de préparation cognitive : le conducteur s'auto-conditionne en quelque sorte à conduire une voiture, et non un simulateur.

Le cockpit de SAAM présente l'intérêt de pouvoir être entièrement fermé. Les portières et les fenêtres isolent le conducteur à la fois des bruits parasites extérieurs (comme par exemple les bruits des vérins) et des mouvements d'air dus aux déplacements

du simulateur (différents des mouvements d'air pouvant rentrer par les fenêtres en conditions réelles). Le conducteur, même lorsque les portières et les fenêtres sont fermées, peut toujours communiquer avec l'expérimentateur par le système d'interphonie.

Les commandes au volant ainsi que la boîte de vitesses sont celles d'origine de la voiture. Ainsi, elles procurent au conducteur un ressenti identique à celui d'une voiture réelle. Par contre, des systèmes à retour d'effort ont dû être rajoutés sur le volant et les pédales.

Un système de retour d'effort passif a été conçu et installé derrière la pédale de frein à la place du système de freinage du véhicule initial. Ce système est composé de ressorts et de rondelles Belleville dont la course et la position initiale sont réglables, afin d'approcher au plus près la loi course / effort désirée. La Figure 64 montre ce système, fixé derrière le plancher de la pédale et apparaissant à l'endroit où se situait le moteur. Il intègre également un capteur d'effort en série avec le mécanisme. La valeur renvoyée par ce capteur est transmise au modèle dynamique pour le calcul de l'effort de freinage du véhicule.



Figure 64 – Système à retour d'effort passif pour la pédale de frein du simulateur SAAM. Fixé derrière le plancher sous le pédalier, il apparaît dans l'ancien compartiment du moteur.

Pour piloter le retour d'effort au volant, un système actif (c'est-à-dire piloté en temps interactif) a été mis en place en utilisant la direction assistée électrique (DAE) présente initialement sur le véhicule. La DAE a été reconfigurée pour pouvoir être pilotée. Ainsi, au lieu d'aider le conducteur à tourner son volant, elle simulera les efforts qu'il doit ressentir en conduisant.

Pour communiquer avec le PC gérant la simulation, un PC industriel PXI National Instruments a été installé dans le coffre du cockpit. Le PXI possède une carte d'entrées/sorties raccordée au bus CAN (Controller Area Network) de l'ancienne Twingo. Le bus CAN est un système de multiplexage permettant aux différents systèmes de la voiture de communiquer entre eux sans avoir à être tous reliés avec des lignes dédiées (connexion point à point). Ainsi, en accédant au bus CAN de la voiture, le PXI est à même de renvoyer au PC « maître » du simulateur les informations de tous les composants du cockpit : les commandes au volant, l'angle au volant, la vitesse de rotation du volant... A l'inverse, le bus CAN est aussi utilisé par le PC « maître » pour piloter la DAE et l'affichage sur le tableau de bord. Le module d'acquisitions de SCANer© qui communique avec le PXI utilise une interface graphique développée avec le logiciel LabView de National Instruments.

5.2.3. Restitution visuelle

La restitution de la scène visuelle se fait grâce à 3 vidéoprojecteurs Projection Design F10 SXGA+ (technologie DLP, 1400x1050 pixels, 3700 lumens ANSI, contraste de 4000 :1, fréquence de rafraîchissement 60 Hz). La scène est projetée sur un écran cylindrique de 150° et de 1,90 m de rayon. Le champ de vision affiché de 150° permet une bonne immersion du conducteur dans la scène virtuelle. De plus, l'écran est suffisamment haut pour que le toit du cockpit empêche le conducteur de voir le haut de l'image.

Les images projetées par les vidéoprojecteurs se trouvent déformées par la forme cylindrique de l'écran. Pour pallier à ce problème, elles subissent un traitement en déformation (*warping*) avant d'être envoyées aux vidéoprojecteurs. Cette déformation est calibrée en fonction du point de vue du conducteur pour lequel l'image est calculée. Par ailleurs, pour une meilleure jointure entre les 3 images (afin de donner l'impression qu'il n'y a qu'une seule image sur tout l'écran), on les fait se superposer. Et pour que les zones de recouvrement des images ne soient pas plus lumineuses, il faut modifier leur luminosité. Cette transformation s'appelle le *blending*. Si on prend l'exemple du raccordement entre l'image de gauche et l'image du centre, et qu'on va de la gauche vers la droite, la luminosité de l'image de gauche diminue progressivement tandis que celle de l'image du milieu augmente. La Figure 65 illustre l'apport des techniques de *warping* et de *blending*.

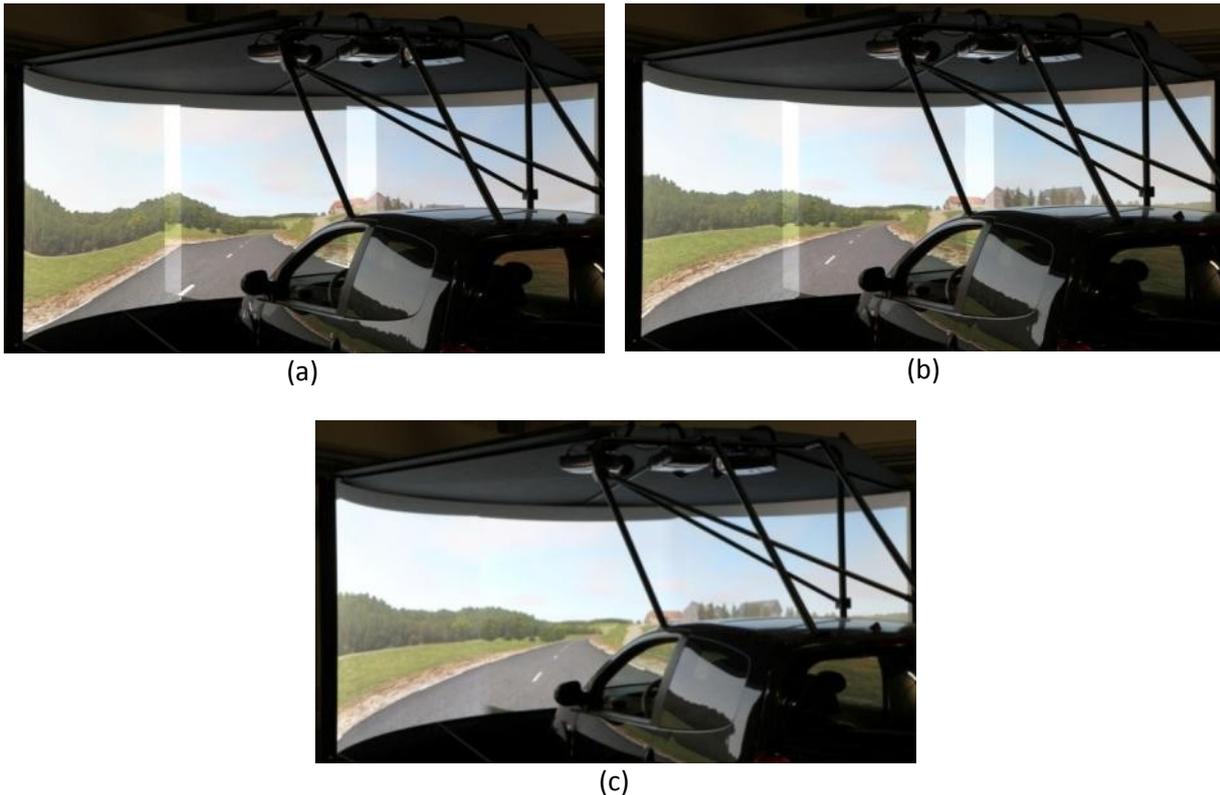


Figure 65 – Illustration des techniques de *warping* et de *blending* sur SAAM.

Le *warping* permet de corriger la distorsion de l'image et le *blending* de modifier la luminosité des images dans les zones de raccordement.

- (a) Restitution visuelle sans *warping* ni *blending*.**
- (b) Restitution visuelle avec *warping* mais sans *blending***
- (c) Restitution visuelle avec *warping* et *blending***

Dans le cas du simulateur SAAM, ces traitements de *warping* et de *blending* sont effectués sur un PC supplémentaire (PC « affichage »). Il possède 3 cartes d'entrée/sortie dédiées qui possèdent chacune une entrée et une sortie DVI. Ces cartes récupèrent les images calculées par les 3 PC « visuel » et renvoient les images aux vidéoprojecteurs après avoir effectué les traitements de *warping* et *blending*. Ce PC supplémentaire effectue également un traitement en colorimétrie pour compenser les différences de restitution colorimétrique existant entre les différents vidéoprojecteurs.

La déformation d'image (*warping*) réalisée par le PC « affichage » est calibrée pour un point de vue donné : celui correspondant à la position des caméras virtuelles. Cette déformation n'est pas calculée grâce à des modèles mathématiques prenant en compte explicitement la géométrie de l'écran et les positions tridimensionnelles des vidéoprojecteurs et du point de vue par rapport à l'écran. Elle est effectuée grâce à un ensemble de déformations d'image : décalage gauche / droite / haut / bas, compression horizontale / verticale, déformation en barillet / coussinet, rotation, etc. Il faut donc, grâce à des mires adéquates, calibrer la déformation grâce à ces différents opérateurs. Une fois la bonne déformation obtenue, on peut bien entendu enregistrer cette configuration.

Dans l'étude présentée dans ce chapitre, on envisage d'utiliser plusieurs points de vue pour calculer l'image. Il a donc fallu, pour chacun de ces points de vue, réaliser les mires correspondantes, calibrer la déformation et enregistrer la configuration alors obtenue. Le changement de configuration prend environ une minute. Pour cette première étude, ce temps relativement long n'était pas problématique. Nous verrons dans le chapitre suivant qu'une autre technique, plus rapide et plus robuste, a dû être développée pour faire varier la correction d'image en temps interactif.

5.2.4. Restitution inertielle

La restitution inertielle du simulateur SAAM se fait grâce à une plate-forme électromécanique MOOG 6 DOF 2000E (Figure 66). Cette plate-forme de type Gough-Stewart possède 6 degrés de liberté. La Figure 67 donne les capacités en termes de position, vitesse et accélération maximales atteignables sur chaque degré de liberté. Elle possède une capacité maximale d'1 tonne, mais il faut cependant noter que plus la charge est faible, plus l'inertie du simulateur est faible et donc plus la fidélité du déplacement (différence entre la trajectoire commandée et la trajectoire réalisée) est bonne. A cette fin, un important travail d'allègement a été réalisé sur le cockpit. La masse mobile totale du simulateur est d'environ 650 kg (sans le conducteur ni les éventuels passagers).



Figure 66 – Plate-forme électromécanique MOOG 6 DOF 2000E à 6 degrés de libertés (6 DDL).

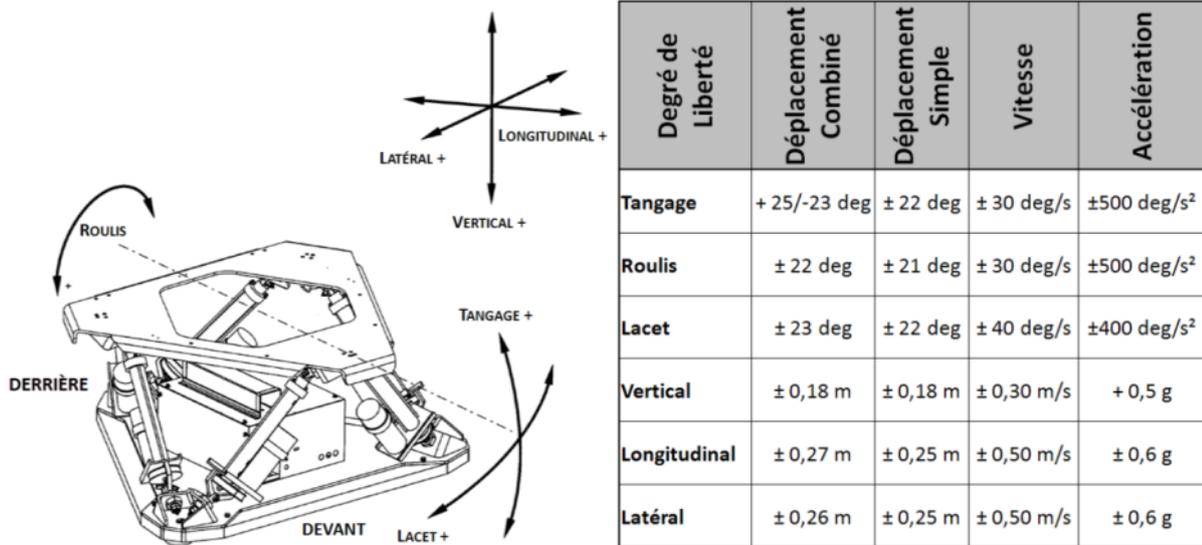


Figure 67 – Capacités de la plate-forme MOOG 6 DOF 2000E selon chaque degré de liberté, en termes de positions, vitesses et accélérations maximales atteignables.

La stratégie de commande choisie pour la restitution des accélérations sur SAAM est la stratégie classique. Ce choix est basé principalement sur la simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie. Les filtres utilisés ont été réglés par essais/erreurs en fonction des ressentis subjectifs de plusieurs conducteurs testeurs.

On notera qu'un important travail de développement logiciel a été mené en parallèle de cette thèse afin de pouvoir piloter la plate-forme MOOG dont le protocole de communication n'était initialement pas pris en charge par SCANer©. Il a donc fallu refaire le module *Motion* de SCANer©, ce module ayant en charge le pilotage des mouvements physiques du simulateur. Ce travail étant hors du champ de cette thèse, il ne sera pas développé ici. Néanmoins, l'Annexe B en fournit les grandes lignes.

5.3. Mesure expérimentale de l'influence du facteur d'échelle visuelle sur la perception de la vitesse longitudinale

5.3.1. Environnement virtuel

L'étude a été menée avec le simulateur SAAM (cf 5.2). Rappelons que pour ce simulateur, la restitution visuelle est assurée par 3 vidéoprojecteurs de résolution 1280x1024 projetant une image continue et sans distorsion sur un grand écran cylindrique de 1,90 m de rayon et couvrant un champ de vision horizontal de 150°. Le logiciel de simulation de conduite utilisé est SCANeR® II. Les conducteurs étaient placés sur un tronçon de route de campagne rectiligne d'environ 2 km (Figure 68).



Figure 68 – Tronçon de route de campagne rectiligne d'environ 2 km utilisé pour l'étude expérimentale.

5.3.2. Expériences préliminaires

Le but de l'étude est de mesurer l'impact du facteur d'échelle visuelle sur la perception de la vitesse longitudinale. Plusieurs tests préliminaires ont été réalisés afin de déterminer quels allaient être les facteurs d'échelle et les vitesses à comparer et les conditions expérimentales à utiliser. Ces tests ont été effectués avec un panel de 9 sujets travaillant au laboratoire. Trois vitesses consignes (50, 70 et 90 km/h) et trois facteurs d'échelle visuelle (0.8, 1.0 et 1.2) ont été comparés.

Tâche à effectuer

Nous avons voulu éviter que le sujet ne connaisse la vitesse consigne qu'on lui demande d'atteindre, ceci afin d'éviter le biais (voir 5.1.1) des expérimentations de (Mourant, et al. 2007) et (Diels et Parkes 2009). La tâche demandée a donc été de reproduire (et non plus de produire) cette vitesse consigne. Ainsi, le sujet ne connaissait à aucun moment la valeur numérique de cette vitesse et aucun biais par rapport à son passif de conduite n'était présent. Ensuite, les vitesses produites ont été comparées aux vitesses consignes, de la même manière que dans les expérimentations de (Mourant, et al. 2007) et (Diels et Parkes 2009).

Pour que le sujet puisse reproduire la vitesse consigne, il fallait dans un premier temps la lui montrer afin qu'il puisse la mémoriser. Pour ce faire, nous avons choisi de faire conduire le sujet une première fois pendant une durée d'environ 1 min avec un régulateur de vitesse préréglé à la valeur de la vitesse consigne. Durant cette phase d'apprentissage, le facteur d'échelle utilisé était de 1.0. Ensuite, cette première phase était suivie de 3 phases de conduite pour comparer chacun des trois facteurs d'échelle visuelle, dans un ordre aléatoire.

Pour résumer, pour chaque vitesse consigne (50, 70 et 90 km/h), le conducteur conduisait une première fois (phase d'apprentissage) avec le régulateur de vitesse réglé à la vitesse consigne et un facteur d'échelle visuelle de 1.0. Puis il conduisait 3 autres fois (phases de conduite) avec des facteurs d'échelle différents : 0.8, 1.0 et 1.2 dans un ordre aléatoire.

Les sujets ont rapporté que pendant les 3 phases de conduite, ils avaient tendance à oublier la vitesse consigne mémorisée pendant la phase d'apprentissage. Après analyse des résultats, nous avons effectivement constaté que les différences entre les vitesses restituées pour chaque facteur d'échelle n'étaient pas toujours significatives. Pour l'étude expérimentale finale, nous avons donc choisi de toujours faire une phase d'apprentissage avant chaque phase de conduite.

Vitesses et facteurs d'échelle visuelle

Pour les tests préliminaires, nous avons arbitrairement choisi de comparer les facteurs d'échelle 0.8, 1.0 et 1.2. La plage de valeurs a volontairement été centrée sur 1.0 afin de pouvoir étudier à la fois la diminution et l'augmentation du facteur d'échelle. De plus, comme pour (Diels et Parkes 2009), nous avons choisi d'inclure la valeur 1.0 afin d'avoir une condition de référence. Pour l'expérimentation finale, nous avons choisi d'étendre cette plage tout en affinant le pas afin de pouvoir étudier plus finement l'impact du facteur d'échelle visuelle. La plage retenue pour l'étude expérimentale finale a donc été : [0.70, 0.85, 1.00, 1.15, 1.30].

La Figure 69 présente des captures d'écran de l'image centrale avec différents facteurs d'échelle visuelle, montrant ainsi leur effet sur l'image calculée. Le véhicule virtuel est toujours à la même position pour toutes ces images.

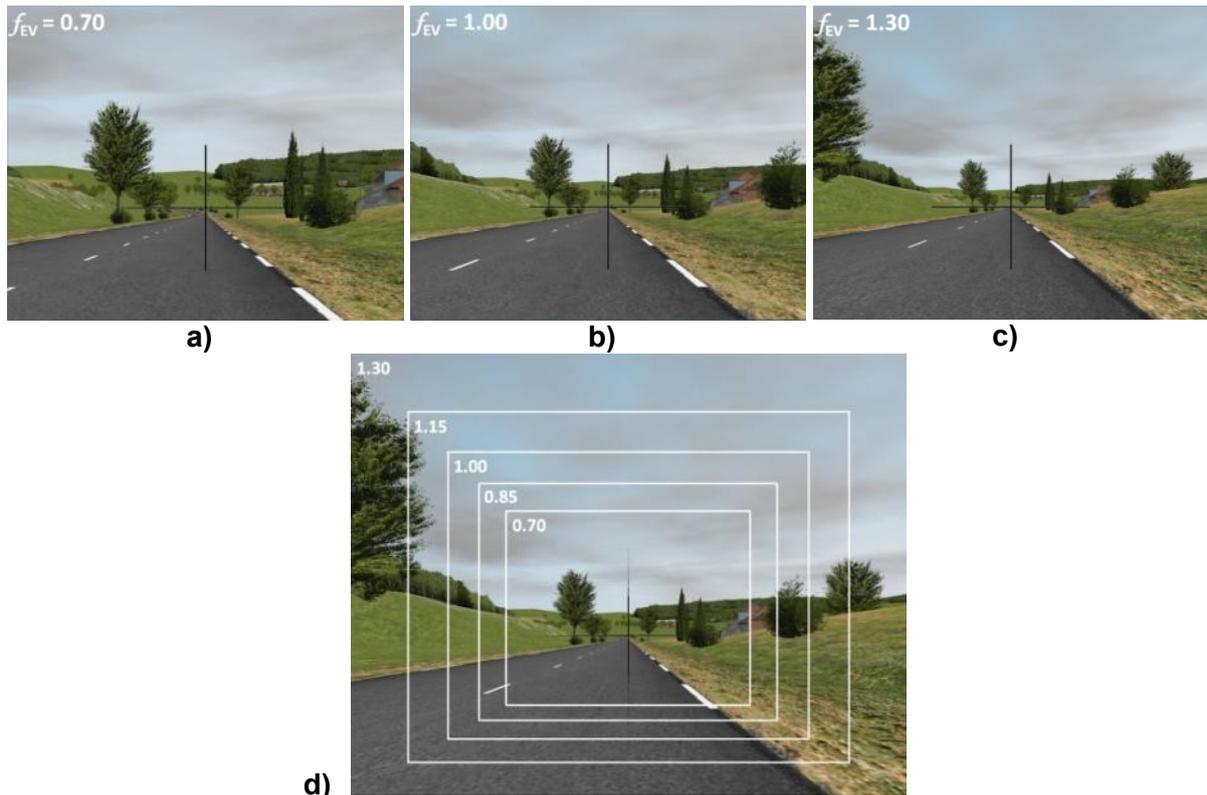


Figure 69 – Captures d'écran prises avec des facteurs d'échelle visuelle différents.

Les facteurs d'échelle sont de 0.70, 1.00 et 1.30 respectivement en a), b) et c).

En d), 5 captures d'écran correspondant aux 5 facteurs d'échelle utilisés pour l'expérimentation (0.70, 0.85, 1.00, 1.15 et 1.30) ont été superposées. Toutes ces captures d'écran (a, b, c et d) correspondent uniquement à l'image centrale affichée par le simulateur, recouvrant 52° du champ de vision horizontal du conducteur.

Pour les vitesses consignes, nous avons choisi de façon également arbitraire les vitesses de 50, 70 et 90 km/h. La vitesse consigne de 70 km/h a été supprimée pour l'étude finale afin de raccourcir la durée de l'expérimentation pour chaque sujet. En effet, avec le passage à une phase d'apprentissage par phase de conduite, et le passage à une gamme plus étendue de facteurs d'échelle visuelle, la durée de l'expérimentation atteignait environ 1h30 par sujet.

Restitution sonore

Pendant les tests préliminaires, la plupart des sujets ont reporté s'être fiés au bruit du moteur pour reproduire la vitesse consigne. La tâche effectuée par les sujets n'était donc plus une reproduction de vitesse visuelle, mais une reproduction de bruit moteur. Il était donc plus difficile d'apprécier l'impact du facteur d'échelle visuelle. Pour cette raison dans l'étude finale, la restitution sonore était désactivée dans les phases de conduite.

5.3.3. Procédure expérimentale

20 volontaires (3 femmes et 17 hommes) extérieurs au laboratoire ont participé à l'étude. Ils avaient de 20 à 69 ans (moyenne 44 ans). Ils avaient tous une vision de 10/10 ou corrigée à 10/10, un permis de conduire valide depuis au moins 2 ans (moyenne 25 ans) et conduisaient en moyenne 26 000 km/an. Les sujets ont tous effectué, avant le début de l'expérimentation proprement dite, une conduite libre pour se familiariser avec les commandes du simulateur de conduite.

Pour chaque vitesse consigne (50 ou 90 km/h) et pour chaque f_{EV} (0.70, 0.85, 1.00, 1.15 ou 1.30), les sujets ont conduit 2 fois :

- une première fois (phase d'apprentissage) pendant environ 1 min avec un régulateur de vitesse réglé à la vitesse consigne ;
- une deuxième fois (phase de conduite) sans le régulateur de conduite.

Ces 2 phases ont été répétées 10 fois afin que chaque sujet effectue l'ensemble des 10 conditions possibles (2 vitesses et 5 f_{EV}) dans un ordre aléatoire. Dans les deux phases, le compteur de vitesse était caché : ainsi les sujets ne savaient jamais à quelle vitesse ils roulaient. Dans la deuxième phase, la tâche demandée aux sujets était de reproduire la vitesse consigne de la première phase et d'indiquer en actionnant le clignotant le moment où ils pensaient avoir atteint cette vitesse. La vitesse du véhicule simulé était enregistrée au moment où le clignotant était activé.

5.3.4. Résultats

La Figure 70 présente les vitesses atteintes par les participants en fonction du facteur d'échelle visuelle. Les valeurs sont organisées par valeur consigne : 50 km/h en cercles bleus et 90 km/h en triangles rouges. Le graphe de gauche (a) présente l'ensemble des valeurs et celui de droite (b) présente les moyennes et les barres d'erreurs correspondant à un indice de confiance de 95%.

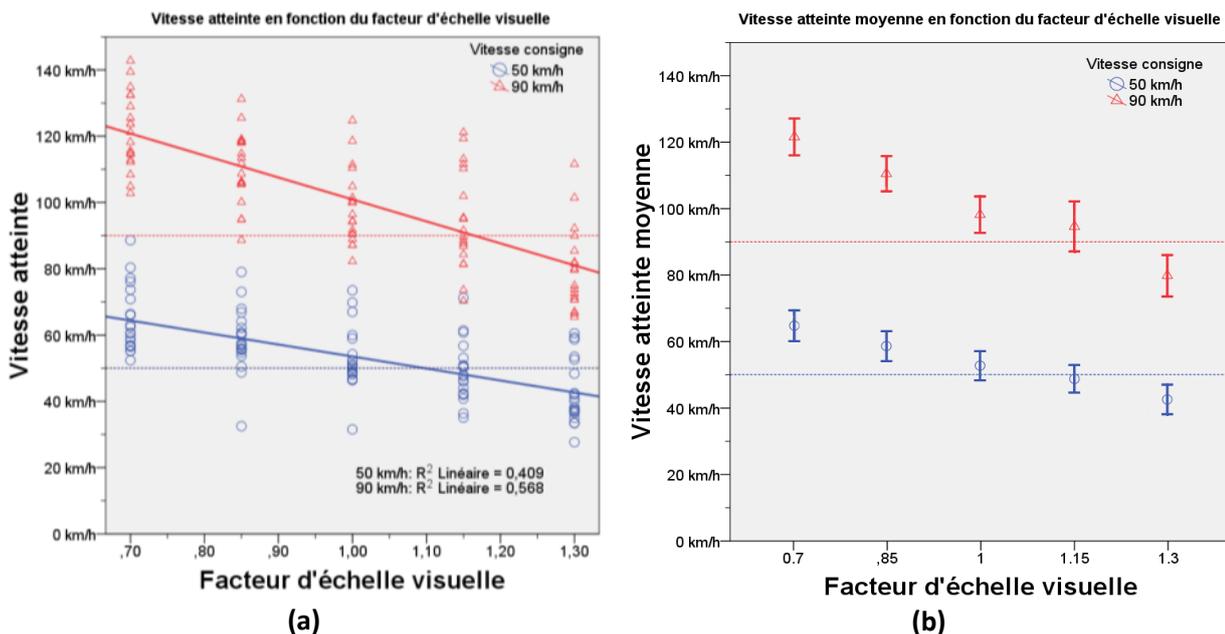


Figure 70 – Vitesse atteinte (a) et vitesse atteinte moyenne (b) en fonction du facteur d'échelle visuelle pour les 2 consignes de vitesse : 50 km/h en cercles bleus et 90 km/h en triangles rouges. Les barres d'erreur verticales correspondent à un indice de confiance de 95%.

Nous pouvons voir sur ces figures que comme nous l'attendions, lorsque le facteur d'échelle visuelle augmente, la vitesse atteinte par les sujets diminue, ce qui équivaut à une augmentation de la vitesse perçue. Cette diminution de la vitesse atteinte semble être linéaire : des régressions linéaires ont été calculées et les coefficients obtenus sont $R^2 = 0.409$ pour la consigne de 50 km/h et $R^2 = 0.568$ pour celle de 90 km/h.

Afin de pouvoir étudier conjointement les données concernant les 2 vitesses consignes, nous avons calculé le ratio entre l'erreur de vitesse produite et la vitesse consigne. La Figure 71 présente les valeurs obtenues (en %) en fonction du facteur d'échelle visuelle. Sur le graphe de gauche (a) on peut voir l'ensemble des valeurs, et sur celui de droite (b) les moyennes et les barres d'erreurs verticales correspondant à un indice de confiance de 95%. On constate toujours une diminution linéaire de l'erreur ($R^2 = 0.469$) lorsque le facteur d'échelle visuelle augmente. On remarque également que l'erreur n'est pas minimisée (en valeur absolue) pour un facteur d'échelle de 1.0, c'est-à-dire identique à celui de la phase d'apprentissage. Ce minimum est obtenu pour une valeur proche de 1.15. Nous n'avons pas d'explication pour ce décalage, si ce n'est l'absence de restitution sonore pendant la phase de conduite.

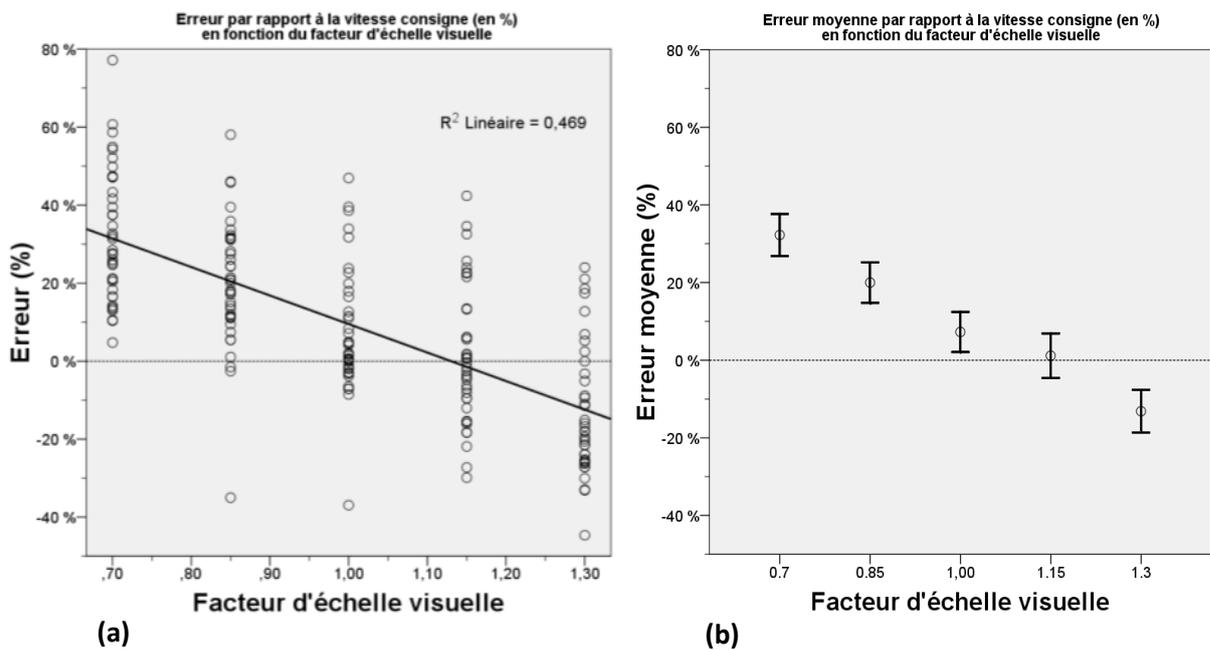


Figure 71 – Erreur (a) et erreur moyenne (b) de la vitesse atteinte par rapport à la vitesse consigne (en %) en fonction du facteur d'échelle visuelle. Les barres d'erreur verticales représentent l'indice de confiance à 95%.

Enfin, pour étudier les résultats individuels, nous avons également calculé pour chaque vitesse produite le ratio entre cette vitesse et la vitesse produite avec un facteur d'échelle visuelle de 1.0 par le même sujet et pour la même vitesse consigne. La vitesse produite par le sujet avec un f_{EV} de 1.0 fournit en quelque sorte une référence pour les autres vitesses produites. La valeur que l'on calcule est donc une erreur relative. La Figure 72 présente les valeurs obtenues, toujours avec le graphe de gauche (a) donnant l'ensemble des valeurs, et le graphe de droite (b) donnant les moyennes et les barres d'erreur verticales correspondant à l'indice de confiance à 95%.

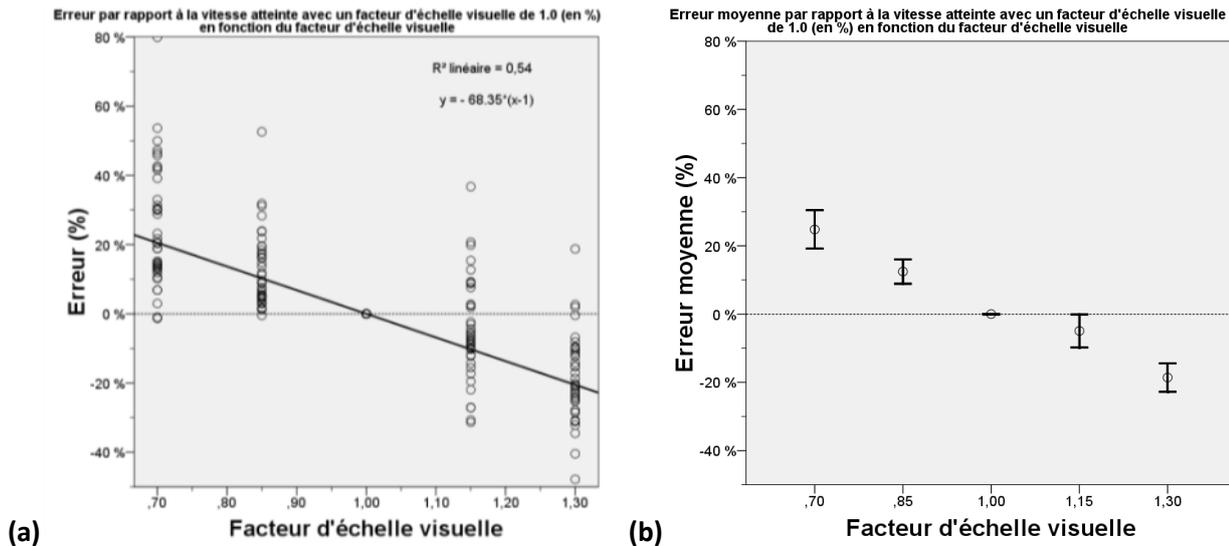


Figure 72 – Erreur (a) et erreur moyenne (b) de la vitesse atteinte par rapport à la vitesse atteinte avec un f_{EV} de 1.0 (en %), en fonction du facteur d'échelle visuelle.

Les barres d'erreur verticales représentent l'indice de confiance à 95%.

A nouveau, cette erreur relative diminue de façon linéaire ($R^2 = 0,54$) lorsque le facteur d'échelle visuelle augmente. On remarque qu'il n'y a que très peu de valeurs négatives pour les f_{EV} de 0.70 et de 0.85 : respectivement 5% et 3%. A l'inverse, les valeurs positives sont nombreuses pour les f_{EV} de 1.15 et 1.30 : respectivement 33% et 10%. On a donc un effet asymétrique du facteur d'échelle visuelle. Lorsqu'il est diminué à 0.70 ou 0.85, les sujets ont conduit plus vite dans 96% des cas, alors que lorsqu'on l'a augmenté à 1.15 ou 1.30, les sujets ont conduit plus lentement dans seulement 79% des cas.

Pour terminer, ces données ont été analysées avec un test ANOVA à 1 facteur avec une analyse post hoc de Tukey. Cette analyse montre que le facteur d'échelle visuelle est hautement significatif ($p < 0,001$) : la diminution des valeurs (vitesses produites, erreurs, erreurs relatives) n'est pas due au hasard. Les résultats post hoc ont montré de plus que la différence était significative ($p < 0,001$) entre chaque facteur d'échelle visuelle, excepté entre 1.00 et 1.15 ($p = 0,431$).

A la question : « Avez-vous vu des changements de restitution visuelle entre les différentes phases de l'expérimentation ? », tous les sujets ont répondu que non.

5.3.5. Discussion

Cette étude montre clairement l'impact du facteur d'échelle visuelle sur la vitesse reproduite par les sujets et donc sur la perception de la vitesse. La vitesse perçue semble varier de façon linéaire par rapport au facteur d'échelle visuelle, aussi bien lorsqu'on l'augmente (valeurs supérieures à 1.00) que lorsqu'on le diminue (valeurs inférieures à 1.00). De plus, les différences au niveau des vitesses produites sont toutes significatives entre chaque f_{EV} excepté entre les f_{EV} de 1.00 et 1.15.

Asymétrie de l'effet

On notera cependant que cette technique semble avoir un effet plus prononcé lorsqu'on diminue le facteur d'échelle visuelle que lorsqu'on l'augmente. Comme on a pu le constater sur la Figure 72.a : par rapport à la vitesse produite avec un f_{EV} de 1.00, la

diminution du f_{EV} a engendré une augmentation de la vitesse produite dans 96% des cas, alors que l'augmentation du f_{EV} n'a engendré une diminution de la vitesse produite que dans 79% des cas.

Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène. Première hypothèse : l'augmentation du f_{EV} a effectivement moins d'effet que sa diminution. Cette hypothèse semble peu probable, car l'effet semble très linéaire. D'autres lois d'évolutions (cubiques, quadratiques, exponentielles...) permettant d'obtenir une loi d'évolution asymétrique mais n'obtiennent pas de coefficients de régression R^2 significativement différents. La deuxième hypothèse qui semble plus plausible est que les conducteurs pourraient être plus enclins à accélérer que freiner, et donc réagiraient préférentiellement à une diminution du facteur d'échelle visuelle plutôt qu'à une augmentation. Toutefois, le manque de données à ce sujet ne nous permet pas de statuer sur la cause de la légère asymétrie des résultats de cette expérimentation.

Effet proportionnel à la vitesse

On peut se poser la question de la légitimité de l'étude des résultats toutes vitesses consignes confondues. L'effet du facteur d'échelle visuelle ne dépend-il pas de la vitesse ? Il apparaît en effet que oui. On peut par exemple remarquer sur la Figure 70.a que la diminution de la vitesse atteinte n'est pas identique pour les 2 vitesses consignes : la pente est de -36.2 [km/h par unité de f_{EV}] pour la vitesse consigne de 50 km/h et de -64.4 pour celle de 90 km/h. Si on appelle « impact du facteur d'échelle visuelle » la valeur absolue de cette pente, alors le f_{EV} a un impact différent en fonction de la vitesse : 36,2 pour une vitesse de 50 km/h, et 64,4 pour une vitesse de 90 km/h.

On peut également faire l'hypothèse que pour une vitesse nulle, l'impact du facteur d'échelle est nul. En d'autres termes, si la vitesse consigne était nulle, tous les sujets devraient normalement reproduire une vitesse nulle quel que soit le facteur d'échelle. Cette hypothèse semble très probable. On se rend alors compte que l'impact est proportionnel à la vitesse consigne, avec un coefficient de régression linéaire très bon de $R^2 = 0.9999$, comme le montre la Figure 73. Cependant, il faudrait faire des mesures supplémentaires avec d'autres vitesses consignes pour valider ce résultat.

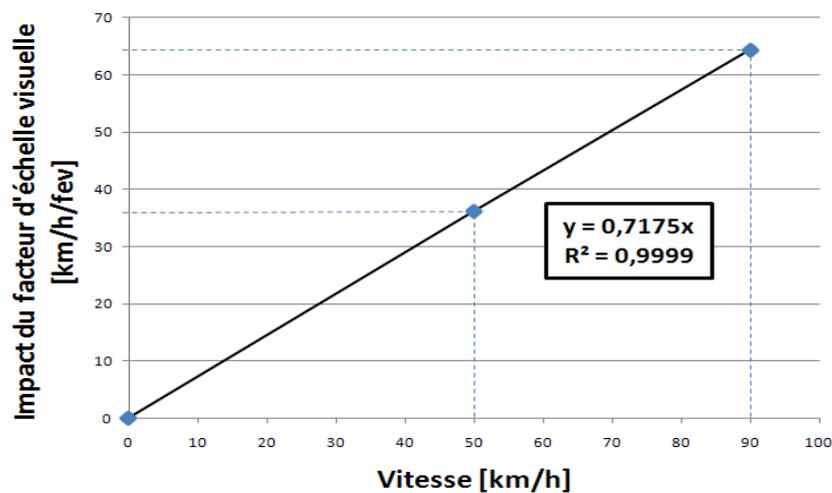


Figure 73 – Impact du facteur d'échelle visuelle en fonction de la vitesse : la progression est très linéaire avec un coefficient de régression linéaire $R^2 = 0.9999$.

L'effet du facteur d'échelle visuelle semble donc dépendre de la vitesse, mais de façon proportionnelle. En étudiant le ratio entre la vitesse atteinte et la vitesse consigne, on peut donc bien étudier les résultats toutes vitesses consignes confondues. Si on reprend la Figure 71.a et la Figure 72.a en distinguant les valeurs en fonction de la vitesse consigne, on s'aperçoit que les points sont confondus et que les courbes de régression linéaires sont parallèles ou quasiment identiques.

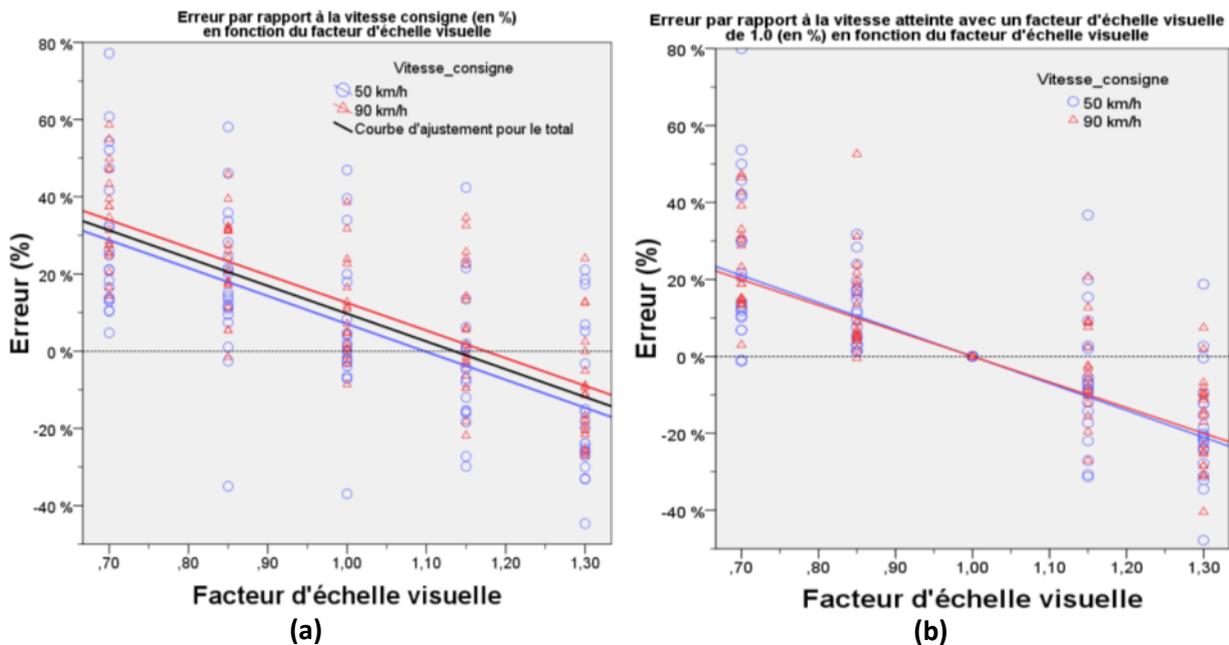


Figure 74 – Reprise de la Figure 71.a et de la Figure 72.a en distinguant les valeurs en fonction de la vitesse consigne.

5.3.6. Conclusions de l'étude expérimentale

- Le facteur d'échelle visuelle a un impact significatif sur la vitesse perçue.
- Une variation de 0.15 du facteur d'échelle visuelle est significative.
- La vitesse perçue augmente linéairement avec le facteur d'échelle visuelle.
- Cette augmentation de la vitesse perçue est elle-même proportionnelle à la vitesse : plus la vitesse est grande et plus la variation de vitesse perçue induite par le f_{EV} est grande également.

5.4. Conclusion et implications pour la simulation de conduite

Cette étude expérimentale a permis de confirmer les résultats de (Mourant, et al. 2007) et de (Diels et Parkes 2009) sur un simulateur dynamique à écran cylindrique. Le facteur d'échelle visuelle (f_{EV}), défini comme le ratio entre le champ de vision géométrique (GFOV) et le champ de vision couvert par le simulateur (FOV) permet d'influer sur la vitesse perçue par le conducteur. Pour une tâche de reproduction de vitesse, nous avons montré que d'une part le f_{EV} a un impact significatif sur la vitesse perçue, et que d'autre part une variation de 0.15 de ce f_{EV} était suffisante pour obtenir un effet significatif.

Nous avons également montré que l'effet du f_{EV} est très linéaire et que son effet est proportionnel à la vitesse du véhicule simulé. En d'autres termes, la variation induite par le f_{EV} sur la vitesse perçue est linéaire. Mais plus la vitesse du véhicule simulé sera grande, et plus cette variation sera grande également.

5.4.1. Loi de variation de la vitesse perçue

Un des objectifs de cette étude expérimentale était de quantifier l'impact du facteur d'échelle visuelle sur la perception de la vitesse. Si on se réfère à la Figure 72, on peut quantifier la variation de vitesse perçue par la loi :

$$\Delta(\%)Vitesse\ perçue = 68.4 * (f_{EV} - 1)$$

Équation 1 – Variation en % de la vitesse perçue en fonction du facteur d'échelle visuelle f_{EV}

Cette loi pourra donc être utilisée pour le réglage d'un simulateur de conduite. Prenons un premier exemple : pour un facteur d'échelle visuelle de 1.30, la vitesse perçue sera 20,5 % plus grande ($68.4 * (1.30 - 1) \approx 20.5$). Donc si pour une vitesse donnée, la vitesse perçue par un conducteur est par exemple de 100 km/h avec un f_{EV} de 1.00, alors pour la même vitesse du véhicule simulé, la vitesse perçue sera de 120,5 km/h avec un f_{EV} de 1.30.

Prenons un autre exemple permettant d'exposer un cas plus concret d'utilisation de la technique du f_{EV} pour le réglage d'un simulateur. Si après avoir fait des études comparatives entre des conduites sur route réelles et des conduites sur simulateur, on parvient à quantifier la différence entre la vitesse du véhicule simulé et la vitesse perçue par le conducteur pour un simulateur donné. Mettons par exemple qu'on estime que la vitesse perçue dans le simulateur est 10% trop faible. Il faudrait donc augmenter la vitesse perçue de $\frac{10}{100-10} = 11.11\%$. Il faut donc employer un facteur d'échelle visuelle tel que : $68.4 * (f_{EV} - 1) = 11.11$, c'est-à-dire un f_{EV} de 1.16.

5.4.2. Vers une utilisation dynamique du facteur d'échelle visuelle

Pour un réglage encore plus fin de la restitution de la vitesse sur un simulateur de conduite, on peut être amené à vouloir modifier dynamiquement le facteur d'échelle visuelle, c'est-à-dire le modifier pendant la conduite. Il est en effet possible que l'écart entre la vitesse perçue sur simulateur et la vitesse perçue en conditions réelles dépende de la

vitesse du véhicule simulé. Par exemple, (Mourant, et al. 2007) préconise pour son simulateur l'utilisation d'un GFOV de 85° pour une conduite à 30 miles/h, et d'un GFOV de 55° pour une conduite à 60 miles/h. Un utilisateur de simulateur de conduite pourrait donc vouloir utiliser des valeurs différentes du f_{EV} en fonction de la vitesse à laquelle roule le véhicule simulé.

Nous avons vu dans notre étude expérimentale que l'utilisation d'un facteur d'échelle visuelle différent de 1.00 n'était pas détectée par les conducteurs. Cette « non-détection » est très importante pour préserver l'immersion et la sensation de présence du conducteur dans le simulateur. Une variation dynamique du facteur d'échelle visuelle devra donc elle aussi s'opérer sans que le conducteur ne la détecte. L'étude des seuils de détection de variation du f_{EV} fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 6 Utilisation dynamique du facteur d'échelle visuelle

6.1. Motivations de l'étude et problématique

Certains simulateurs peuvent ne pas procurer la même sensation de vitesse qu'en conduite réelle. Ce phénomène non désiré peut provenir d'un faible champ de vision procuré par le simulateur, d'une base de données visuelle pauvre en détails, de l'absence de restitution vibratoire, d'une restitution sonore non réaliste... Pour ces simulateurs, la perception de la vitesse est souvent sous-estimée, se traduisant alors par une conduite plus rapide des conducteurs. De ce fait, la maîtrise du véhicule (pour les virages ou un freinage par exemple) peut être affectée. Un utilisateur de simulateur voudra donc essayer de corriger cette différence de vitesse perçue.

Le facteur d'échelle visuelle (f_{EV}), défini comme le ratio entre le champ de vision géométrique (GFOV) et le champ de vision (FOV), permet dans un simulateur de conduite de modifier le flux optique vu par le conducteur et ainsi de moduler sa perception de la vitesse. Cette technique peut donc permettre dans une certaine mesure de corriger la différence de vitesse perçue existant dans certains simulateurs, comme nous l'avons vu au Chapitre 5. La « correction » sur la vitesse perçue apportée par le facteur d'échelle visuelle est alors proportionnelle à la vitesse du véhicule.

D'autre part, aussi bien dans les expérimentations de (Mourant, et al. 2007), (Diels et Parkes 2009) ou celle présentée au Chapitre 5, aucun conducteur n'a reporté de différence visuelle entre les conduites avec des facteurs d'échelle visuelle différents. Ce résultat montre qu'utiliser un facteur d'échelle visuelle différent de 1.00 n'altère pas l'immersion ou la présence du conducteur dans l'environnement de conduite virtuel.

Toutefois, la différence à corriger entre la vitesse perçue dans le véhicule réel et la vitesse perçue dans le simulateur n'est pas toujours proportionnelle à la vitesse du véhicule simulé. Par exemple (Mourant, et al. 2007) préconise pour leur simulateur l'utilisation d'un GFOV de 85° (correspondant à un f_{EV} de 1,889) pour une conduite à 30 miles/h, et d'un GFOV de 55° (correspondant à un f_{EV} de 1,222) pour une conduite à 60 miles/h. On s'aperçoit donc que pour corriger la vitesse perçue d'une façon plus adaptée, il faudrait faire varier le facteur d'échelle visuelle de façon dynamique, en fonction de la vitesse du véhicule simulé.

Cette variation dynamique pose alors le problème du maintien de la sensation de présence du conducteur dans l'environnement de conduite virtuel. En effet, nous avons vu que l'utilisation de facteurs d'échelle visuelle différents ne modifiait a priori pas cette sensation de présence. En revanche, si pendant la conduite le f_{EV} est modifié dynamiquement, le conducteur peut détecter ce changement : l'immersion serait alors altérée et le comportement du conducteur serait de ce fait modifié.

Notre hypothèse est que la détection de ce changement va dépendre de la vitesse de variation du facteur d'échelle visuelle. Une variation infiniment lente ne sera pas détectée alors qu'une variation brusque (infiniment rapide) sera détectée. Pour une utilisation dynamique du f_{EV} tout en préservant la sensation de présence du conducteur dans l'environnement virtuel, il va donc falloir faire varier le facteur d'échelle suffisamment lentement pour ne pas être détecté.

La question est : quelle valeur utiliser pour atteindre ce « suffisamment lentement » ? L'étude expérimentale présentée dans ce chapitre vise à déterminer par une méthode psychophysique le seuil de détection au niveau de la vitesse de variation du facteur d'échelle visuelle.

6.2. Méthodes psychophysiques pour la mesure de seuils de détection

Le but de l'étude envisagée ici est de pouvoir mesurer un seuil de détection, et nous allons pour ce faire choisir une méthode parmi celles existant en psychophysique. Afin de mieux éclairer les raisons des choix que nous allons faire, cette partie présente les principales méthodes de mesure de seuil existantes.

6.2.1. Généralités sur la psychophysique

La psychophysique est une discipline assez récente, dont les bases ont été posées par Gustav Theodor Fechner (1801-1887) en 1860 (Fechner 1860). L'idée principale de Fechner était d'établir une méthode scientifique d'étude des « relations entre le corps et l'esprit », c'est-à-dire en termes plus précis la relation entre un stimulus physique et la perception qu'on en a. Jusqu'à aujourd'hui, de nombreuses tâches et méthodes ont été développées et mises au point, essentiellement pour la mesure de seuils. On peut chercher à estimer soit un seuil absolu, c'est-à-dire l'intensité minimum d'un stimulus pour qu'il soit détecté, ou un seuil différentiel (aussi connu sous le nom de *Just Noticeable Difference JND*), c'est-à-dire la différence minimum nécessaire entre 2 stimuli pour qu'ils puissent être distingués.

Le seuil de détection n'est jamais une valeur « franche » à partir de laquelle le stimulus devient instantanément et complètement perceptible. Il existe toute une zone aux alentours de ce seuil où le stimulus passe de l'état « non perceptible » à l'état « perceptible ». Si on trace la courbe représentant le pourcentage de réponses positives à un stimulus en fonction de l'intensité de celui-ci, on obtient ce qu'on appelle une courbe psychométrique, dont l'allure en S (Figure 75) montre bien l'aspect transitoire de la perception du stimulus autour du seuil de détection. La courbe psychométrique est généralement approchée par une fonction normale cumulative, représentant la fonction de répartition de la loi normale (ou gaussienne), ou par une sigmoïde qui représente la fonction de répartition de la loi logistique.

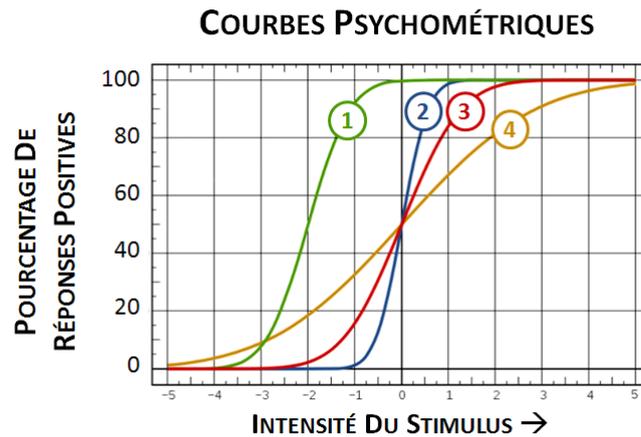


Figure 75 – Exemples de fonctions psychométriques représentées par des normales cumulatives. Elles représentent le pourcentage de réponses positives à un stimulus en fonction de son intensité. Le seuil de détection absolu est défini comme l'intensité du stimulus permettant d'obtenir 50% de réponses positives. Celui correspondant à la courbe (1) est -2, alors que celui des courbes (2), (3) et (4) est 0. Plus l'allure de la courbe tend vers celle d'un échelon, et plus le seuil de détection différentiel (JND) sera faible. Ainsi le seuil différentiel de la courbe (2) est inférieur à celui de la courbe (3), qui lui-même est inférieur à celui de la courbe (4).

Les méthodes psychophysiques de mesure de seuil vont donc chercher à déterminer la courbe psychométrique correspondant au stimulus étudié, ou tout du moins des paramètres remarquables de cette courbe. Les deux paramètres les plus mesurés sont :

- La position de la courbe, déterminant ainsi le seuil de détection absolu. Cette position est généralement définie par le niveau de stimulus correspondant à 50% de réponses justes, généralement appelé X_{50} . Il s'agit par exemple sur la Figure 75 de la valeur 0 pour les courbes (2), (3) et (4) et de la valeur -2 pour la courbe (1).
- La forme de la courbe, déterminant le seuil différentiel. Plus l'allure de la courbe tend vers celle d'un échelon et plus le seuil différentiel sera faible. On quantifie généralement l'allure de la courbe par la différence de 2 points remarquables : X_{25} et X_{75} par exemple ou encore X_{30} et X_{70} .

6.2.2. Les méthodes existantes

Ehrenstein (Ehrenstein et Ehrenstein 1999) fait une revue des différentes méthodes psychophysiques de mesure de seuil existantes. Il existe 5 principales méthodes : méthode de l'ajustement, méthode des limites, méthode des stimuli constants, les tests adaptatifs et la méthode du choix forcé.

Méthode de l'ajustement

Il s'agit tout simplement dans cette méthode de laisser le sujet adapter l'intensité du stimulus jusqu'à ce qu'il soit perçu (ou qu'il disparaisse) dans le cas d'une détection de seuil absolu, ou qu'il soit égal à un autre stimulus de référence dans le cas d'une détection de seuil différentiel. Cette méthode est la plus simple et une des plus rapides pour déterminer un seuil. C'est par ailleurs la seule où le sujet contrôle lui-même le stimulus. Typiquement pour cette méthode, les 2 types de séries possibles (ascendante ou descendante) sont alternés plusieurs fois et les valeurs obtenues pour chaque série sont ensuite moyennées pour obtenir une estimation du seuil.

Méthode des limites

La méthode des limites est semblable à celle de l'ajustement. La différence se situe dans le fait que l'intensité du stimulus est contrôlée par l'expérimentateur. La variation se fait par pas discrets, constants et successifs. Comme pour la méthode de l'ajustement, les résultats d'une succession de séries ascendantes et descendantes sont moyennés pour obtenir l'estimation du seuil.

Méthode des stimuli constants

Dans cette méthode, la plage des intensités du stimulus que l'on veut tester est discrétisée, et chaque valeur est alors testée plusieurs fois, le tout dans un ordre aléatoire. La réponse du sujet est enregistrée à chaque fois (stimulus perçu ou non pour un seuil absolu, stimulus « plus fort » ou « plus faible » pour un seuil différentiel). A la fin de l'expérimentation, pour chaque intensité du stimulus testée, le pourcentage de réponses correctes est calculé. Ces données, tracées en fonction de l'intensité du stimulus, permettent d'obtenir la fonction psychométrique. Le seuil est alors la valeur de l'intensité du stimulus permettant d'obtenir 50% de réponses correctes.

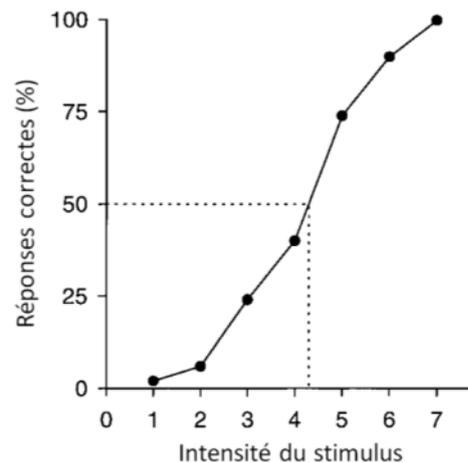


Figure 76 – Exemple de courbe psychométrique obtenue expérimentalement avec la méthode des stimuli constants, d'après (Ehrenstein et Ehrenstein 1999).

Pour chaque intensité du stimulus, le pourcentage de réponses correctes est calculé. Le seuil est déterminé comme l'intensité du stimulus permettant d'obtenir 50% de réponses correctes. Ici il est calculé à environ 4,3.

Cette méthode est reconnue comme celle permettant d'obtenir la meilleure estimation d'un seuil de perception. Toutefois son inconvénient principal est de demander beaucoup de temps à l'expérimentateur, et beaucoup de patience et d'attention aux sujets du fait du grand nombre d'essais requis.

Tests adaptatifs

Si uniquement la valeur du seuil nous intéresse, il est inutile de chercher à déterminer précisément l'ensemble de la courbe psychométrique. La procédure des tests adaptatifs permet de garder l'intensité du stimulus proche du seuil. A chaque test, l'intensité du stimulus à tester est calculée en fonction de la réponse du sujet au test précédent. Ainsi elle permet d'obtenir plus rapidement la valeur du seuil par rapport à la méthode des stimuli constants. Cette méthode est également appelée méthode des *staircases*, et a été introduite par von Békésy pour de l'audiométrie (von Békésy 1947).

Prenons par exemple le cas d'une détermination de seuil absolu avec une série descendante (Figure 77). L'intensité du stimulus est diminuée de la valeur du pas du *staircase* à chaque nouveau test tant que le sujet perçoit le stimulus. Cependant, la série ne s'arrête pas au moment où le sujet ne détecte plus le stimulus comme dans la méthode des limites. Lorsque le sujet change de réponse, le sens de variation de l'intensité du stimulus s'inverse. On continue jusqu'à obtenir plusieurs retournements (typiquement de 6 à 9). Les intensités du stimulus oscillent alors autour de la valeur du seuil, que l'on estime par la moyenne des intensités du stimulus aux retournements. Dans l'exemple de la Figure 77, la valeur estimée du seuil de détection absolu est : $\frac{3+6+5+6+4+5+4+5}{8} = 4,75$.

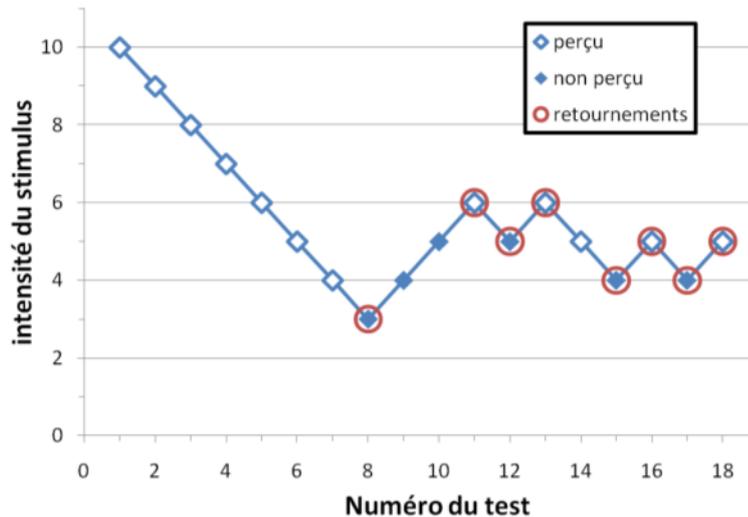


Figure 77 – Exemple de staircase descendant.

La valeur du stimulus au test suivant est augmentée de la valeur du pas si le stimulus n'est pas perçu, et diminué de la valeur du pas si le stimulus est perçu. La série est ici arrêtée après 8 retournements. La valeur estimée du seuil absolu est de 4,75 (moyenne des intensités du stimulus aux retournements).

Améliorations des tests adaptatifs

Pour éviter que le sujet ne puisse deviner l'intensité du stimulus au prochain test, il est conseillé d'entrelacer plusieurs *staircases*, soit de façon alternée ou soit de façon aléatoire. De plus, pour améliorer la vitesse de convergence de cette méthode, le pas peut évoluer au cours de la série : il peut par exemple être réduit de moitié aux 2 ou 3 premiers retournements. Le pas final est ainsi suffisamment fin pour avoir une estimation précise du seuil, tout en ayant un pas initial suffisamment important pour approcher rapidement la valeur du seuil. Dans ce cas, l'estimation du seuil est faite en moyennant les valeurs aux retournements uniquement après avoir atteint le pas final. La Figure 78 présente un exemple de 2 *staircases* entrelacés avec un pas variable.

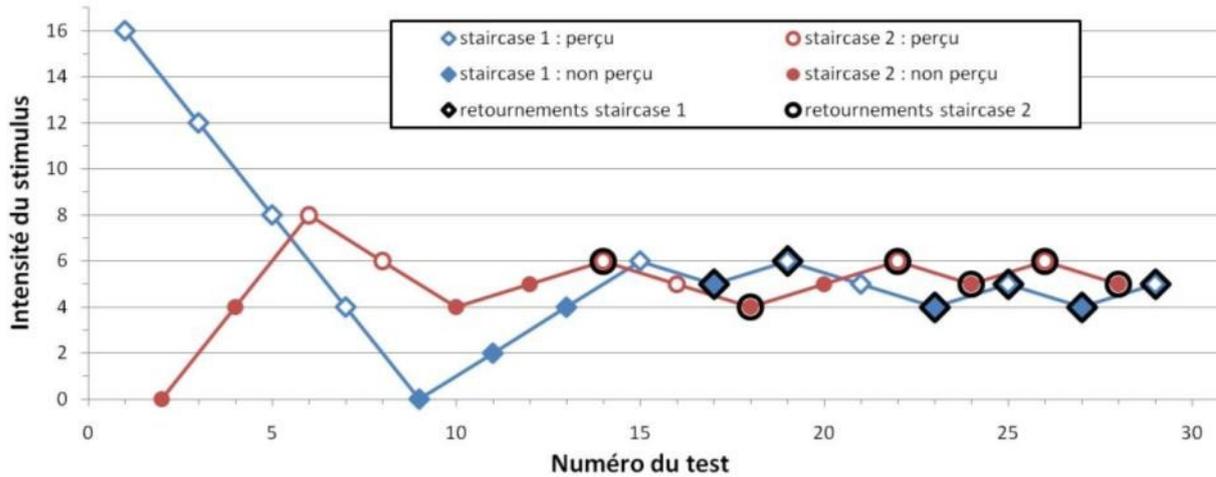


Figure 78 – Exemple de mesure de seuil avec 2 staircases (un ascendant et un descendant) entrelacés de façon alternée, avec un pas variable.

Aux 2 premiers retournements, le pas est réduit de moitié. Pour l'estimation du seuil, seules les valeurs de retournement obtenues avec le pas final sont prises en compte. On obtient par exemple un seuil de 4,83 pour le premier staircase, et de 5,33 pour le deuxième. La valeur finale retenue pour l'estimation du seuil sera alors de 5,08.

Méthode du choix forcé

Toutes les méthodes présentées jusqu'ici sont des méthodes dites subjectives, car elles reposent sur ce que le sujet dit percevoir, et dépend donc du critère que le sujet se fixe pour déterminer s'il a perçu ou non le stimulus. Certaines personnes auront par exemple un critère relativement haut afin de minimiser le risque de s'être trompé en affirmant avoir perçu le stimulus. D'autres au contraire auront un critère personnel relativement bas pour minimiser le risque de s'être trompés en affirmant cette fois-ci ne pas avoir perçu le stimulus.

La méthode du choix forcé est une méthode plus objective, où l'expérimentateur force le sujet à faire une réponse positive à chaque test. Par exemple, au lieu d'utiliser une lampe et de demander au sujet s'il a perçu de la lumière, on peut utiliser deux lampes de part et d'autre d'un point de fixation, n'en allumer qu'une de façon aléatoire et forcer le sujet à dire de quel côté il a vu de la lumière. Le résultat ainsi obtenu est plus précis : des stimuli sont encore discernés dans des tests à choix forcé (70 à 75% de choix corrects) lorsque l'intensité est inférieure aux seuils établis par des méthodes non-forcées et plus subjectives (Sekuler et Blake 2001).

6.3. Correction de l'image en temps réel

Après cette revue des méthodes psychophysiques de détermination de seuil, nous allons à présent aborder un problème de correction d'image que nous avons du résoudre pour mener à bien notre expérimentation.

6.3.1. Position du problème

Pour projeter une scène visuelle sur un écran cylindrique (ou tout autre écran non plan), il est nécessaire d'effectuer une déformation de celle-ci, comme nous l'avons vu dans la partie 5.2.3 sur la restitution visuelle du simulateur SAAM. Cette déformation correspond à un point de vue donné. Lorsqu'on utilise la technique du facteur d'échelle visuelle, ce point de vue est amené à changer : de ce fait, la déformation de l'image effectuée doit changer avec le point de vue.

Nous avons vu que sur le simulateur SAAM, la correction géométrique de l'image ne pouvait pas être effectuée en prenant en compte explicitement le point de vue. Elle est effectuée grâce à un ensemble de différents opérateurs de déformations d'image. Pour l'expérimentation précédente, plusieurs corrections d'images ont donc été calibrées pour les différents points de vue correspondant aux différents facteurs d'échelle utilisés. Dans l'étude envisagée dans ce chapitre, on désire faire varier dynamiquement le facteur d'échelle visuelle, et donc le point de vue. La déformation de l'image doit donc être modifiée en temps réel, ce qui n'est pas possible avec la configuration actuelle du simulateur. En effet, il est uniquement possible d'effectuer une déformation que l'on peut qualifier de « statique », car ne pouvant varier pendant la simulation, et correspondant à un seul point de vue.

Nous avons donc mis au point une technique permettant de rajouter une deuxième déformation que l'on qualifiera de « dynamique ». Cette déformation « dynamique » est calculée en temps réel en fonction de la position du point de vue courant par rapport au point de vue de référence de la déformation « statique » et en fonction également des géométries de l'écran et du plan de projection de la caméra. Cette déformation est faite via un *pixel shader*. La Figure 79 présente la géométrie du problème à résoudre.

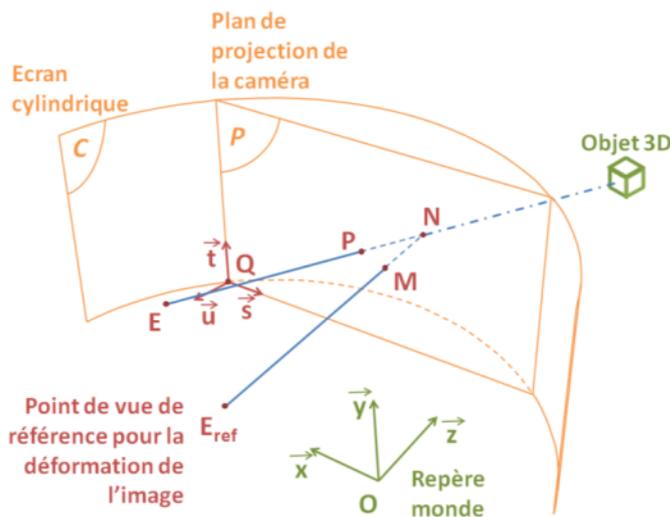


Figure 79 – Géométrie du problème de déformation de l'image en fonction du point de vue.

On nomme C l'écran cylindrique sur lequel est projetée l'image. L'équation de ce cylindre est supposée connue. On nomme P le plan de projection de la caméra, connu également et défini par le point Q et les vecteurs \vec{s} et \vec{t} . La caméra est asymétrique (voir 4.3.5) : lorsque le point de vue est déplacé, ce plan reste constant. La déformation « statique » calibrée pour le point de vue E_{ref} fait que pour la position des vidéoprojecteurs par rapport à l'écran, un pixel M du plan de projection de la caméra est projeté en N tel que E_{ref} , M et N soient alignés.

Changeons maintenant la position du point de vue, par exemple au point E . Lorsque l'image est calculée, un objet 3D est affiché au pixel P . Pour que l'image affichée sur l'écran soit géométriquement correcte pour un observateur placé en E , il faudrait que ce pixel soit affiché en N sur l'écran cylindrique tel que E , P et N soient alignés. Or la déformation « statique » fait que ce pixel P sera affiché en N' (non représenté sur la Figure 79) tel que E_{ref} , P et N' soient alignés. Le pixel placé initialement en P doit donc être déplacé en M afin d'être projeté en N par la déformation statique.

Le *pixel shader* que nous avons développé effectue cette transformation. Chaque pixel P de l'image calculée est déplacé au point M correspondant en fonction de la position du point de vue courant E , du point de vue de référence E_{ref} , de la forme de l'écran cylindrique C et du plan de projection de la caméra P . Pour être exact, le *shader* effectue un calcul un peu différent : un *shader* reçoit en entrée une image (ici l'image à déformer) et calcule pixel par pixel l'image qu'il fournira en sortie (image déformée). Le raisonnement à effectuer est donc de partir du point M et de chercher le point P correspondant dont il faut récupérer la couleur pour l'attribuer au point M .

6.3.2. Résolution du problème

Données du problème

On connaît :

- la position du point de vue de référence $E_{\text{ref}} \begin{pmatrix} x_{\text{ref}} \\ y_{\text{ref}} \\ z_{\text{ref}} \end{pmatrix}$;
- la position courante du point de vue $E \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$;
- le plan P , grâce au point $Q \begin{pmatrix} x_Q \\ y_Q \\ z_Q \end{pmatrix}$ et aux vecteurs $\vec{s} \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix}$ et $\vec{t} \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$;
- le cylindre C , de rayon R et d'axe de révolution (O, \vec{y}) ;
- les coordonnées s_0 et t_0 du point M .

Calcul du point M

Par définition, on a :

$$M \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_Q \\ y_Q \\ z_Q \end{pmatrix} + s_0 \cdot \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} + t_0 \cdot \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$$

Calcul du point N

On sait que N appartient au cylindre C, on peut donc écrire ses coordonnées sous la forme :

$$N \begin{pmatrix} x_N = R \sin \theta \\ y_N \\ z_N = R \cos \theta \end{pmatrix}$$

On sait que M, E_{ref} et N sont alignés. On a donc :

$$\overrightarrow{E_{ref}N} \wedge \overrightarrow{E_{ref}M} = \vec{0}$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} R \sin \theta - x_{ref} \\ y_N - y_{ref} \\ R \cos \theta - z_{ref} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} E_{ref}M_x \\ E_{ref}M_y \\ E_{ref}M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{avec } \begin{cases} E_{ref}M_x = x_M - x_{ref} \\ E_{ref}M_y = y_M - y_{ref} \\ E_{ref}M_z = z_M - z_{ref} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} (1) & E_{ref}M_z \cdot (y_N - y_{ref}) - E_{ref}M_y \cdot (R \cos \theta - z_{ref}) = 0 \\ (2) & E_{ref}M_x \cdot (R \cos \theta - z_{ref}) - E_{ref}M_z \cdot (R \sin \theta - x_{ref}) = 0 \\ (3) & E_{ref}M_y \cdot (R \sin \theta - x_{ref}) - E_{ref}M_x \cdot (y_N - y_{ref}) = 0 \end{cases}$$

$$(2) : \sin \theta = A \cos \theta + B \quad \text{avec } \begin{cases} A = \frac{E_{ref}M_x}{E_{ref}M_z} \\ B = \frac{x_{ref}}{R} - \frac{E_{ref}M_x \cdot z_{ref}}{R \cdot E_{ref}M_z} \end{cases}$$

Or : $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$, d'où :

$$[A^2 + 1] \cdot \cos^2 \theta + [2 \cdot A \cdot B] \cdot \cos \theta + [B^2 - 1] = 0$$

$$\Rightarrow \Delta = 4(A^2 - B^2 + 1)$$

$$\Rightarrow \cos \theta = \frac{-A \cdot B \pm \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1}$$

On choisit la solution telle que $\cos \theta > 0$, en on en déduit $\sin \theta = A \cdot \cos \theta + B$ avec (2)

Puis $x_N = R \sin \theta$, $z_N = R \cos \theta$ et $y_N = y_{ref} + \frac{E_{ref}M_y}{E_{ref}M_x} \cdot (R \sin \theta - x_{ref})$ avec (1).

Calcul du point P

On cherche les coordonnées s et t du point P.

Le vecteur \vec{u} , normal au plan P, est défini par :

$$\vec{u} = \vec{s} \wedge \vec{t} \Leftrightarrow \begin{cases} u_x = s_y t_z - s_z t_y \\ s_y = s_z t_x - s_x t_z \\ s_z = s_x t_y - s_y t_x \end{cases}$$

On sait que P appartient à la droite (EN). On peut donc définir entièrement le point P avec le réel k, tel que :

$$\overrightarrow{EP} = k \overrightarrow{EN}$$

Or, comme P appartient également au plan P, on a :

$$\vec{u} \cdot \overrightarrow{QP} = 0$$

D'où :

$$\vec{u} \cdot (\overrightarrow{QE} + k\overrightarrow{EN}) = 0$$

$$\Leftrightarrow k = -\frac{\vec{u} \cdot \overrightarrow{QE}}{\vec{u} \cdot \overrightarrow{EN}}$$

On en déduit alors les coordonnées s et t du point P par :

$$\begin{cases} s = \frac{\overrightarrow{QP} \cdot \vec{s}}{\|\vec{s}\|^2} \\ t = \frac{\overrightarrow{QP} \cdot \vec{t}}{\|\vec{t}\|^2} \end{cases}$$

6.3.3. Implémentation de la solution

Ce calcul a été implémenté dans un pixel shader, qui a été utilisé pour l'étude expérimentale ci-après. Le code de ce shader est donné en Annexe C.

6.4. Mesure expérimentale du seuil de perception du changement de facteur d'échelle visuelle

6.4.1. Procédure expérimentale

Hypothèses et conditions à tester

Le but de l'expérimentation est de déterminer le seuil de détection de changement du facteur d'échelle visuelle. Nous pensons qu'en plus des différences individuelles, plusieurs conditions peuvent avoir un impact sur la valeur de ce seuil.

- Premièrement, nous avons vu que l'effet du f_{EV} est proportionnel à la vitesse. Donc nous pensons que la vitesse à laquelle se déplace le sujet aura a priori un impact sur le seuil que nous voulons mesurer.
- Deuxièmement, nous avons également vu que l'effet du f_{EV} semblait présenter une asymétrie. Le sens de variation du f_{EV} (vitesse de variation positive ou négative) nous semble donc a priori avoir également un impact sur le seuil que nous voulons mesurer.

Nous avons donc choisi de mesurer le seuil de détection de changement du facteur d'échelle visuelle pour 3 conditions de vitesse : 30, 60 et 90 km/h ; et pour 2 conditions de variation : vitesse de variation négative ou positive.

Méthode psychophysique utilisée

Nous avons choisi pour cette expérimentation de mesure de seuil d'utiliser la méthode des tests adaptatifs car nous ne cherchons pas à obtenir la courbe psychométrique complète, mais uniquement la valeur du seuil de perception. De plus, la méthode des tests adaptatifs est celle convergeant le plus rapidement. Ainsi, l'attention du sujet n'est pas sollicitée pendant une période trop longue.

De plus, pour chaque condition testée, 2 *staircases* (1 ascendant et 1 descendant) sont menés en parallèle, en étant entrelacés de manière aléatoire. Les pas de ces *staircases* sont variables : ils sont réduits de moitié aux deux premiers retournements, afin de converger rapidement vers la valeur du seuil tout en ayant une estimation suffisamment fine du seuil mesuré. Après quelques rapides tests, nous avons fixé un pas initial arbitraire de 0.04 unités de f_{EV} . Après 2 retournements, on atteint le pas final qui sera donc de 0.01.

Déroulement de l'expérimentation

Pour chaque sujet, le seuil de détection de changement de facteur d'échelle visuelle est mesuré dans une des 6 conditions, c'est-à-dire pour une vitesse (30, 60 ou 90 km/h) et pour un sens de variation (f_{EV} qui diminue ou qui augmente). Pour cette condition, différentes vitesses de variation du f_{EV} sont testées selon la méthode des *staircases* (expliquée dans la partie précédente) afin de pouvoir estimer le seuil de perception.

Pour les tests, nous avons choisi d'utiliser un choix forcé afin d'avoir une méthode plus objective et ainsi des résultats plus précis. Pour ce faire, 2 séquences visuelles sont montrées au sujet dans un ordre aléatoire. Dans l'une, le f_{EV} reste constant et dans l'autre, il

varie à la vitesse de variation que l'on souhaite tester. Ces 2 séquences sont entrecoupées de 2 secondes d'absence d'image (« noir »). A l'issue de cela, le sujet est forcé d'indiquer dans laquelle des deux séquences visuelles le f_{EV} variait. La Figure 80 illustre le déroulement d'un test.

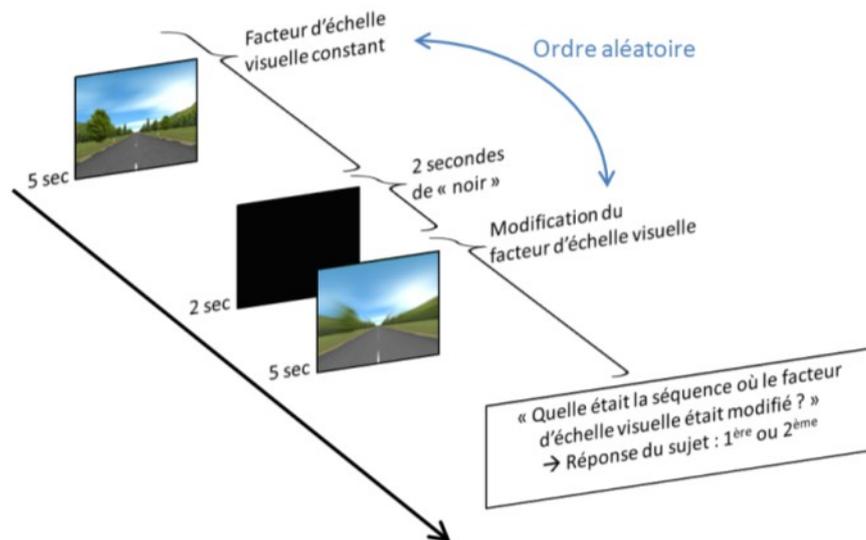


Figure 80 – Déroulement du test à choix forcé.

6.4.2. Environnement virtuel

Pour cette deuxième expérimentation, le sujet est passif. Il ne fait que regarder la scène visuelle sans avoir à conduire. Nous avons voulu utiliser les mêmes conditions visuelles que pour l'expérimentation précédente et donc cette étude a été menée en utilisant à nouveau le cockpit et l'écran du simulateur SAAM. Du fait de la passivité du sujet, l'utilisation du logiciel de simulation de conduite SCANer© nous a paru peu adaptée. Nous avons donc choisi d'utiliser le logiciel Virtools (www.virttools.com) et son module « VRPack », permettant de facilement créer et exécuter des applications 3D interactives sur cluster d'ordinateurs.

Modélisation de l'environnement virtuel

Ne disposant pas d'une base de données correspondant à un environnement routier et utilisable avec Virtools, un environnement virtuel a été modélisé pour les besoins de cette expérimentation. Cet environnement devait être à la fois suffisamment réaliste sans toute fois être trop long à réaliser. La Figure 81 en présente une illustration.



Figure 81 – Illustrations de l'environnement virtuel utilisé pour l'expérimentation.

Cet environnement a été créé de façon simple avec :

- 1 plan horizontal sur lequel a été appliquée une texture (Figure 82.D) représentant la route et la verdure de part et d'autre de cette route ;
- 2 plans verticaux sur lesquels a été appliquée une texture de forêt (Figure 82.A) ;
- des plans verticaux disposés aléatoirement de chaque côté de la route sur lesquels ont été appliquées des textures (Figure 82.B) d'arbres ;
- des plans verticaux disposés régulièrement le long de la route sur lesquels a été appliquée une texture (Figure 82.C) de balise de signalisation routière (type délinéateur).

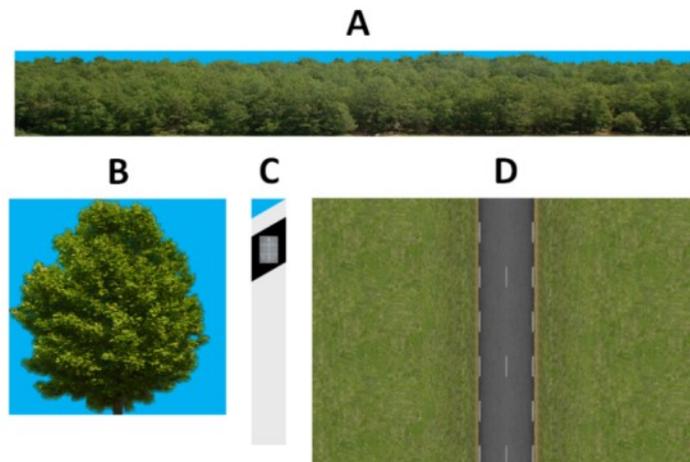


Figure 82 – Textures utilisées pour modéliser l'environnement virtuel.

Les zones bleues sur les textures A, B et C sont les zones qui seront transparentes grâce à la couche alpha.

Une texture est généralement composée de 3 couches de couleur (rouge, vert et bleu) à laquelle peut être ajoutée une couche appelée couche alpha, permettant de gérer la transparence de la texture. Cette couche alpha est une image en niveaux de gris permettant de coder la transparence : à un pixel blanc de la couche alpha correspondra une transparence de 100%, et à un pixel noir une transparence nulle (opacité de 100%). Nous avons donc utilisé sur certaines textures la couche alpha pour rendre une partie de la texture transparente. Ces zones transparentes sont représentées en bleu sur les textures A, B et C de la Figure 82. Cette technique nous a permis d'avoir une scène visuellement réaliste sans

dépenser d'efforts importants de modélisation 3D. La vue panoramique à 150° de la Figure 83 permet de rendre compte de l'environnement virtuel tel qu'il était vu par le sujet placé dans le cockpit.



Figure 83 – Vue panoramique à 150° de l'environnement virtuel, du point de vue du conducteur.

Défilement

Pour donner au sujet la sensation d'un mouvement vers l'avant, il était difficilement envisageable de le faire avancer dans l'environnement virtuel. En effet, il aurait fallu pour cela que l'environnement soit de très grande taille, afin que le conducteur ne perçoive jamais le « bout », même après avoir avancé pendant tout le temps de l'expérimentation. Nous avons donc choisi de faire défiler dans le sens inverse les textures sur les plans horizontaux et verticaux (comme un tapis roulant), ainsi que de faire se translater - dans le sens inverse également - les arbres et les balises de signalisation routière. Comme le conducteur virtuel reste immobile dans l'environnement virtuel, il a de cette manière l'impression de se déplacer vers l'avant.

Comme les plans horizontaux et verticaux ne bougent pas, on peut faire défiler de façon continue la texture qui leur est appliquée indéfiniment : lorsque la texture se décale, la partie qui est hors de la surface texturée est reportée de l'autre côté, à la manière d'un tapis roulant. La Figure 84 illustre ce principe couramment utilisé en réalité virtuelle et très facilement réalisable grâce au logiciel Virtools.

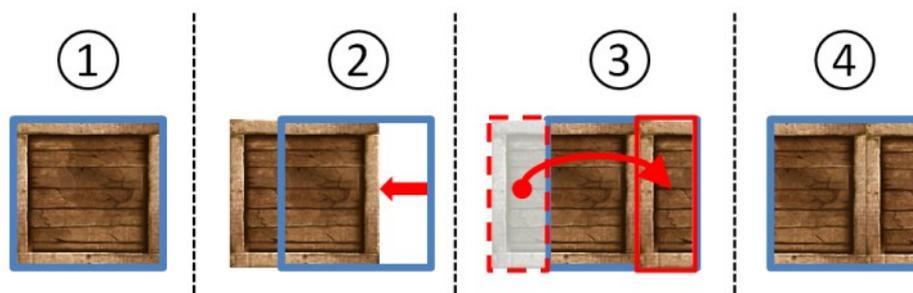


Figure 84 – Illustration du défilement d'une texture.

- (1) Etat initial.
- (2) La texture est décalée, par exemple vers la gauche.
- (3) La partie de la texture en dehors de la surface texturée est ramenée de l'autre côté (ici à droite).
- (4) Etat final.

Contrairement au plan horizontal et aux 2 plans verticaux qui restent immobiles, les arbres et les balises sont réellement translattés. Ils finissent donc par tous passer derrière le

conducteur virtuel et ne plus être vus. Pour résoudre ce problème, la première solution envisagée était de supprimer les arbres et les balises lorsqu'ils sortaient du champ de vision du conducteur, et d'en créer d'autres au fur et à mesure qui commenceraient à se translater dès leur création. Cependant, ce procédé s'est avéré être trop gourmand en ressources et posait des problèmes de synchronisation entre les différents ordinateurs du cluster. La solution retenue a donc simplement été de « téléporter » (au lieu de supprimer) les arbres et les balises à l'autre extrémité de l'environnement virtuel, lorsqu'ils passaient derrière le conducteur virtuel.

Vitesse de défilement

Une des conditions dont on souhaite étudier l'influence au cours de cette expérimentation est la vitesse du conducteur. Nous avons vu qu'il n'est pas possible de connaître notre vitesse de façon absolue uniquement avec le flux optique : il nous faut aussi des repères d'échelle ((Kemeny et Panerai 2003), (Berger 2009), (Gibson 1954)). Donc pour pouvoir déterminer à quelle vitesse avance le conducteur, il faut se baser sur la taille des éléments de l'environnement virtuel pouvant donner un indice précis d'échelle.

Une route peut avoir une largeur variable. Elle doit être dans des proportions réalistes (de 6 à 10,5 m pour une route à 2 voies) ; toutefois il n'existe pas de largeur de route normée. Il en va de même pour les arbres, qui doivent avoir une taille plausible (de 6 à 15 m environ), mais pour lesquels ils n'existent pas non plus de taille normée. Les marquages sur la route et les délinéateurs ont en revanche des dimensions normalisées, identiques sur toutes les routes. Nous nous sommes donc appuyés sur les normes existantes pour créer les géométries et les textures correspondantes, et ainsi pouvoir définir une vitesse de défilement.

Les délinéateurs sont des balises de signalisation routière de type J6, et le marquage de la route correspond à celui d'une route de campagne à 2 voies d'une largeur de 8 mètres. Les dimensions normalisées qui ont été utilisées pour la création de l'environnement virtuel sont données en Figure 85. Nous avons choisi de positionner les délinéateurs de façon régulière tous les 40 mètres. Pour comparaison avec la Figure 81 et la Figure 83, la Figure 86 montre une photographie d'une route de rase campagne réelle avec des délinéateurs.

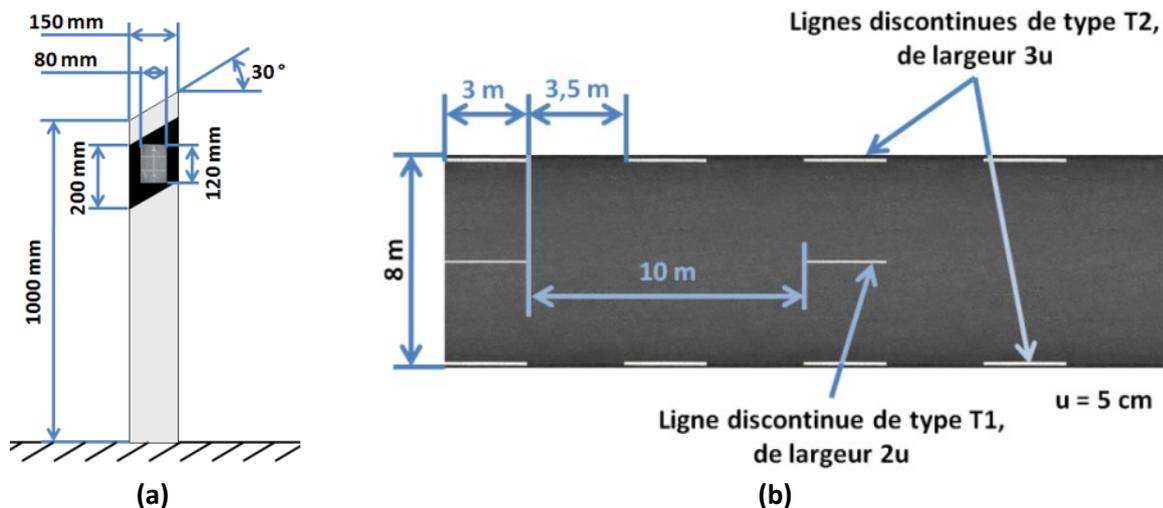


Figure 85 – Dimensions normalisées françaises d'éléments routiers.

- (a) Balise de signalisation routière (délinéateur) de type J6.
- (b) Marquage d'une route de rase campagne à 2 voies de 8 mètres de large.



Figure 86 – Photographie d'une route de rase campagne réelle avec des délinéateurs (source : Wikimedia Commons) pour comparaison avec la Figure 81 et la Figure 83.

6.4.3. Evolution du protocole

L'environnement étant modélisé et prêt à être utilisé, nous avons effectués des tests préliminaires pour améliorer si besoin notre protocole.

Résultats préliminaires

Ces tests préliminaires ont été effectués avec 7 sujets, afin d'avoir une première estimation des seuils obtenus. Le seuil de chaque sujet a été mesuré dans 2 conditions. Nous avons donc obtenu pour ces tests préliminaires 14 valeurs de seuil réparties sur les 6 conditions (3 conditions de vitesse et 2 conditions sur le sens de variation). La Figure 87 présente les résultats obtenus.

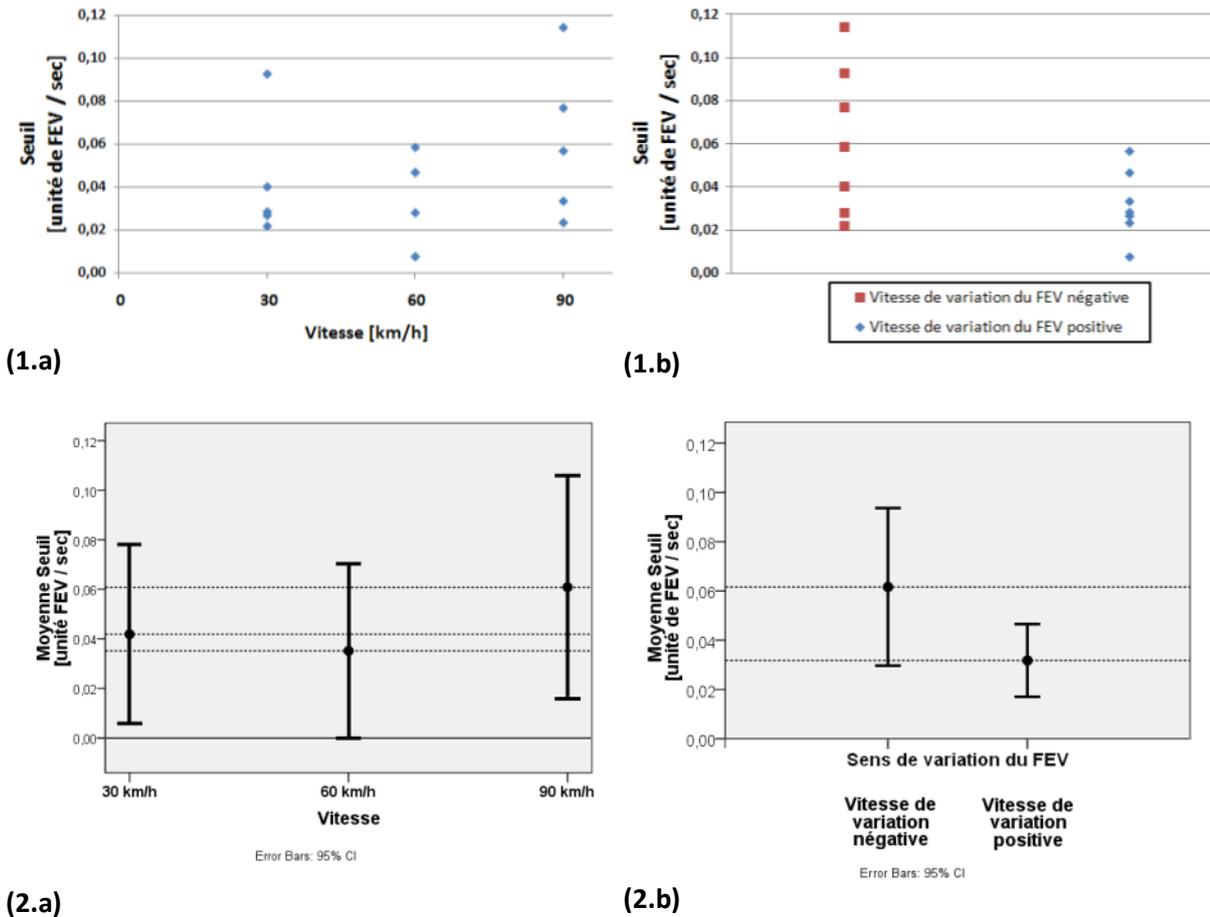


Figure 87 – Résultats obtenus au cours des tests préliminaires.

- Les deux graphes (1) présentent les seuils de perception mesurés, en valeur absolue.
- Les deux graphes (2) présentent les moyennes de ces seuils : les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.
- Les graphes (a) présentent les résultats en fonction de la vitesse de déplacement : 30, 60 ou 90 km/h.
- Les graphes (b) présentent quant à elles les résultats en fonction du sens de variation du facteur d'échelle visuelle. Soit le facteur d'échelle diminue (vitesse de variation négative), soit il augmente (vitesse de variation positive).

On remarque premièrement qu'il existe des différences inter-individuelles fortes. Toutefois, les résultats montrent également que le seuil que l'on cherche à déterminer existe bien. En effet, une possibilité aurait été que les sujets détectent immédiatement une modification dynamique du facteur d'échelle visuelle. Le seuil de perception (en valeur absolue) moyen obtenu lors de ces tests préliminaires est de $0,045 \text{ s}^{-1}$.

Concernant la vitesse de déplacement, on ne distingue pas de tendance contrairement à nos hypothèses. Nous nous attendions en effet à constater une variation du seuil de perception moyen avec la vitesse. La vitesse de déplacement ne semble donc pas avoir d'influence significative sur le seuil de perception ($p = 0,436$). En revanche, l'influence du sens de variation est quasi-significative ($p = 0,06$). L'augmentation du facteur d'échelle visuelle semble donc être mieux détectée qu'une diminution par les sujets. Le seuil de perception moyen pour une vitesse de variation négative est en effet de $0,062 \text{ s}^{-1}$, alors qu'il est seulement de $0,032 \text{ s}^{-1}$, c'est-à-dire environ la moitié, pour une vitesse de variation positive.

Protocole final utilisé pour l'expérimentation

Comme la vitesse de déplacement ne semble pas avoir d'influence, nous avons choisi de réduire à 2 le nombre de conditions sur les vitesses : 50 km/h et 90 km/h. Il n'y a donc plus que 4 conditions testées au total pour l'expérimentation : les 2 conditions de vitesses et les 2 conditions sur le sens de variation du facteur d'échelle visuelle.

Par ailleurs durant les tests préliminaires, nous avons eu plusieurs retours d'expérience nous permettant d'améliorer le protocole. Tout d'abord, l'expérimentation était assez éprouvante pour les sujets car ils devaient rester concentrés à chaque instant. En effet, rien n'indiquait le début des séquences visuelles et les sujets devaient donc se tenir constamment prêts. Un compte à rebours a donc simplement été rajouté au début du protocole afin de prévenir le sujet du début des séquences visuelles. Il n'est donc plus obligatoire de rester concentré entre deux tests.

D'autre part, comme la salle de simulation était plongée dans le noir, le contraste dû à l'alternance entre des écrans noirs et les séquences visuelles étaient également fortement désagréables pour les sujets. Nous avons donc remplacé les écrans noirs par des écrans « gris » plus lumineux, aussi bien entre les deux séquences visuelles de chaque test qu'entre les tests eux-mêmes. Le protocole final que nous avons adapté peut donc être décrit comme dans la Figure 88.

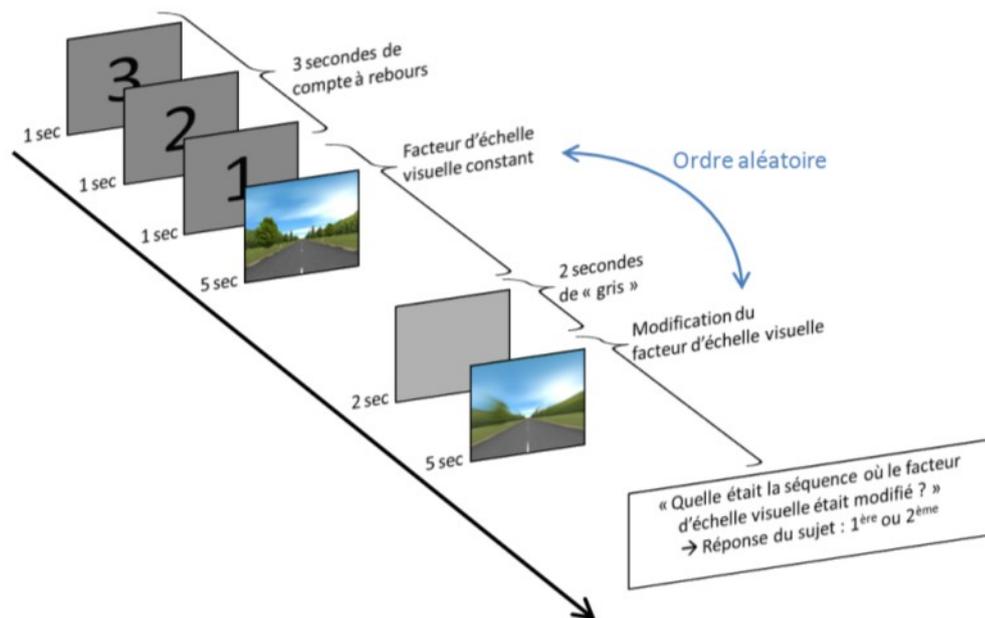


Figure 88 – Protocole final utilisé pour l'expérimentation.

Un compte à rebours a été rajouté afin que le sujet n'ait pas à rester constamment concentré. Les écrans noirs ont été remplacés par des écrans « gris » afin de diminuer le contraste avec les séquences visuelles.

Une dernière modification a été apportée concernant la modification du facteur d'échelle visuelle. En effet, dans le protocole initial, le f_{EV} augmente à vitesse constante (celle que l'on veut tester) pendant toute la durée de la séquence visuelle. La valeur que le f_{EV} atteint à la fin de la séquence est donc variable d'un test à l'autre. Ainsi certains sujets ont rapporté s'être fiés dans quelques cas à la différence entre la valeur finale et la valeur initiale. Nous avons donc choisi de seuiliser la valeur du facteur d'échelle à 1.10 pour les cas d'augmentation du f_{EV} et à 0.9 pour les cas de diminution. La Figure 89 illustre cette

différence entre le protocole initial et le protocole final au niveau de la variation du f_{EV} au cours du temps.

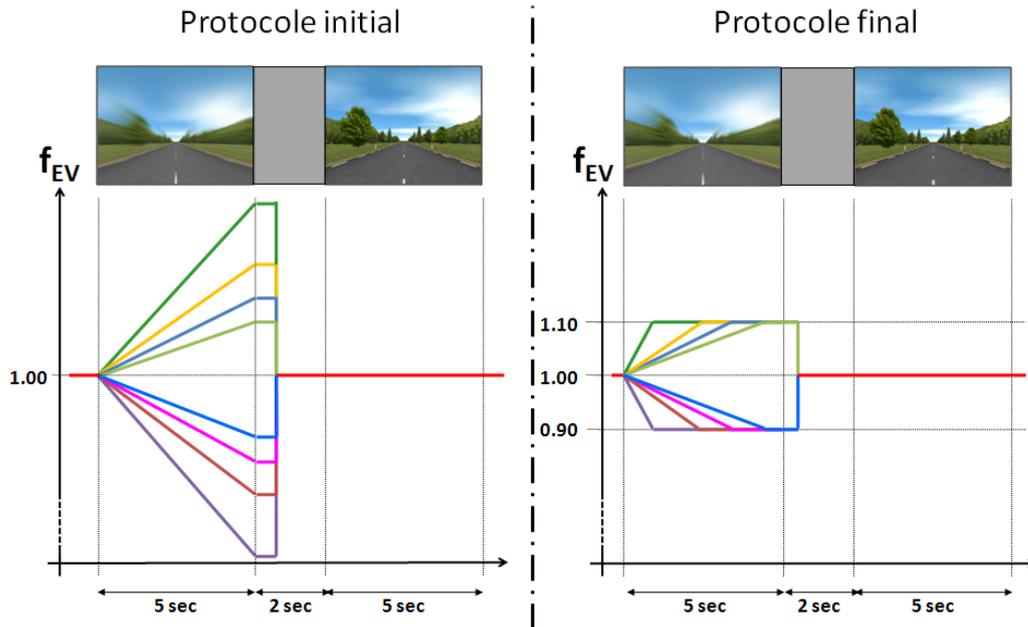


Figure 89 – Illustration de la différence entre le protocole initial et le protocole final au niveau de la variation du facteur d'échelle visuelle au cours du temps.

Dans le protocole final, la valeur du facteur d'échelle est seuillée afin que la valeur finale soit identique quelle que soit la vitesse de variation du f_{EV} .

6.4.4. Résultats

14 sujets ont été testés, chacun dans deux conditions. Nous avons donc obtenu 28 valeurs de seuils, réparties de façon égale entre chacune des 4 conditions globale. La Figure 90 présente une synthèse des résultats.

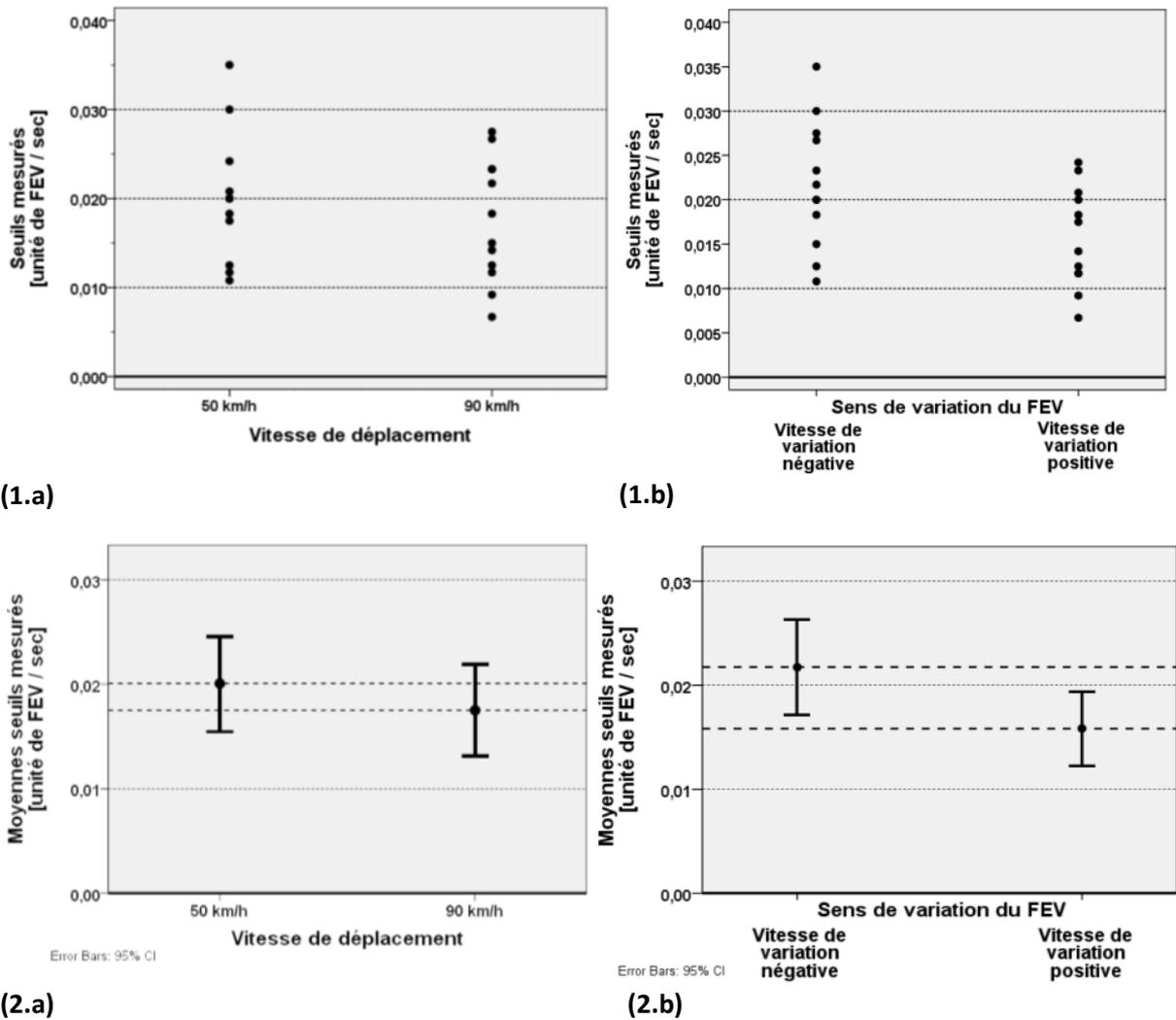


Figure 90 – Résultats de l'étude expérimentale.

- Les graphes (1) présentent les valeurs individuelles des seuils de perception mesurés, en valeur absolue.
- Les graphes (2) présentent les moyennes de ces seuils : les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.
- Les graphes (a) présentent les résultats en fonction de la vitesse de déplacement : 50 ou 90 km/h.
- Les graphes (b) présentent quant à elles les résultats en fonction du sens de variation du facteur d'échelle visuelle. Soit le facteur d'échelle diminue (vitesse de variation négative), soit il augmente (vitesse de variation positive).

Comme pour les tests préliminaires, on retrouve une large disparité interindividuelle, avec parfois un facteur 8 entre deux seuils correspondant à une même condition (même sens de variation et même vitesse de déplacement). Toutefois, on remarque également que les valeurs obtenues sont en moyenne plus faibles que pour les tests préliminaires. Le seuil de perception (en valeur absolue) moyen obtenu est de $0,019 \text{ s}^{-1}$.

Comme pour les tests préliminaires, la vitesse de déplacement n'a pas d'impact significatif ($p = 0,384$) et le sens de variation du facteur d'échelle visuelle est significatif ($p = 0,037 < 0,05$). On retrouve à nouveau le fait qu'une augmentation du facteur d'échelle visuelle est perçue de façon plus précise qu'une diminution. Pour une vitesse de variation positive, le seuil de perception moyen est de $0,016 \text{ s}^{-1}$ et de $0,022 \text{ s}^{-1}$ pour une vitesse de variation négative.

L'analyse statistique condition par condition des valeurs de seuils mesurées n'a pas donné de résultat concluant. Toutefois, la Figure 91 présente les moyennes des seuils de perception mesurés, dans les 4 conditions testées.

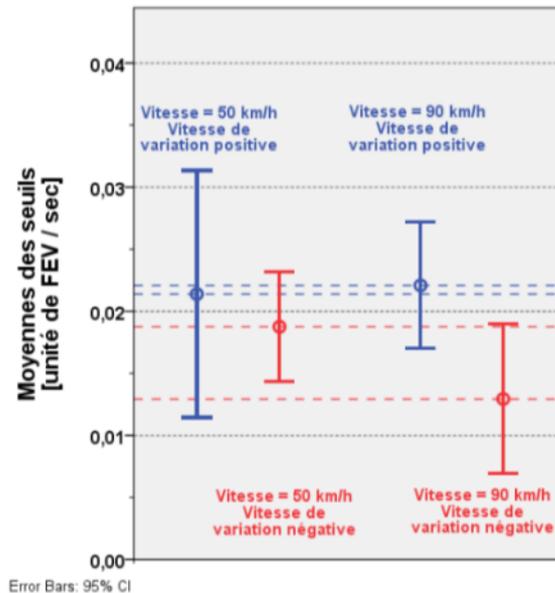


Figure 91 – Moyennes des seuils de perception mesurés, en fonction de chaque condition.

- Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%.
- Les courbes bleues correspondent à une vitesse de variation positive (augmentation du facteur d'échelle visuelle) et les courbes rouges à une vitesse de variation négative (diminution du facteur d'échelle).
- Les 2 courbes de gauche correspondent à une vitesse de déplacement de 50 km/h, et celles de droite à une vitesse de déplacement de 90 km/h.

6.4.5. Discussion

Au vu des résultats de l'étude présentée au Chapitre 5, l'effet du facteur d'échelle visuelle est fortement lié à la vitesse de déplacement. Nous n'avons pas d'explication quant au fait que cette vitesse de déplacement n'a pas d'impact significatif sur le seuil de perception de changement du f_{EV} .

Il est intéressant de voir que le sens de variation du f_{EV} est significatif. En effet, lorsque le facteur d'échelle varie, le champ de vision varie également, créant ainsi un flux optique venant s'ajouter à celui du mouvement principal. Lorsque le facteur d'échelle augmente, le flux supplémentaire ainsi créé est un flux de compression semblable à celui d'un déplacement vers l'arrière et lorsque le facteur d'échelle diminue, le flux créé est un flux d'expansion semblable à celui d'un déplacement vers l'avant. On s'aperçoit alors que les sujets ont été plus performants pour déceler un flux optique supplémentaire qui venait en opposition à celui du mouvement principal, donnant donc la sensation illusoire de ralentir. Toutefois, on peut discuter ce résultat au vu des données présentées dans la Figure 91. En effet, on y voit clairement que l'impact du sens de variation est très significatif à la vitesse de 90 km/h, mais qu'il ne l'est pas pour 50 km/h.

Enfin, on note une nette diminution des valeurs des résultats obtenus lors de l'expérimentation finale par rapport aux tests préliminaires. Nous expliquons cette baisse par les changements de protocole qui ont notamment accru le confort des sujets durant l'expérimentation. Nous pensons qu'ils étaient de ce fait plus à-mêmes de percevoir des changements plus fins de variation du facteur d'échelle visuelle.

6.5. Conclusion et implications pour la simulation de conduite

Cette étude expérimentale a permis d'estimer le seuil de perception du changement de facteur d'échelle visuelle, c'est-à-dire la vitesse de variation maximale du f_{EV} permettant de ne pas être perçue par le conducteur. Le seuil moyen mesuré sur un ensemble de 14 sujets est de $0,019 \text{ s}^{-1}$. Par exemple, le passage de 1.00 à 1.15 du f_{EV} doit être fait en au minimum 7,9 secondes afin de ne pas être détecté par le sujet.

De plus, en comparant plusieurs conditions, nous avons montré que ce seuil n'est pas affecté par la vitesse de déplacement mais qu'en revanche le sens de variation est un facteur significatif. Les sujets semblent en effet être plus précis pour la détection d'une augmentation du facteur d'échelle visuelle que pour une diminution. Le seuil moyen obtenu pour la détection d'une augmentation du f_{EV} est de $0,016 \text{ s}^{-1}$ et de $0,022 \text{ s}^{-1}$ pour une diminution.

Ainsi, que le sujet se déplace par exemple à 50 km/h ou à 90 km/h, le temps minimum pour passer d'un f_{EV} de 1.00 à un f_{EV} de 1.15 sans être perçu par le conducteur est identique. Par contre, le passage de 1.00 à 1.15 doit être effectué en un temps plus long que le passage de 1.15 à 1.00. Selon les données obtenues, le temps minimum pour une augmentation de 0.15 du f_{EV} est de 9,4 secondes, contre 6,8 secondes pour une diminution de même amplitude.

Utilisation pratique

Qu'en est-il de la possibilité d'utiliser concrètement le facteur d'échelle visuelle de façon dynamique ? Le seuil de perception n'est-il pas trop faible pour permettre une variation suffisamment rapide du facteur d'échelle ?

Nous répondrons à cela premièrement en soulignant que l'expérimentation présentée ici plaçait le conducteur dans une condition de conduite passive. Il pouvait donc se concentrer uniquement sur la tâche qui lui était demandée, c'est-à-dire la détection du changement de facteur d'échelle. Il est donc fort probable que les valeurs mesurées soient plus faibles que celles qui pourraient être obtenues en conduite active, autorisant alors des variations de facteur d'échelle plus rapides.

D'autre part, en regardant les données « constructeur » des grands groupes automobiles, on peut situer aux alentours de 12 secondes le temps moyen qu'une voiture « standard » met pour passer de 0 à 100 km/h. Ce temps de 12 secondes permet d'effectuer un changement de facteur d'échelle de 0,23 selon les résultats obtenus dans cette étude. Cette variation semble a priori suffisante. Toutefois, il n'est bien sûr pas possible de conclure de façon catégorique sans connaître l'ajustement que l'on doit effectuer sur le simulateur. Pour cela, il faut déterminer la courbe vitesse perçue en fonction de la vitesse du véhicule, aussi bien en conditions réelles que sur simulateur. Ainsi, on connaîtra l'écart de vitesse perçue à compenser et de ce fait les variations maximales à effectuer sur le facteur d'échelle.

Chapitre 7 Conclusion générale

7.1. Synthèse des résultats

La perception du mouvement ne dépend pas que d'un seul organe mais plutôt du recoupement de plusieurs modalités sensorielles. La vision entre autres joue un rôle de premier plan aussi bien dans la perception de la direction du mouvement, que dans la perception de la vitesse. Le système vestibulaire, sorte de centrale inertielle du corps humain, va détecter les accélérations et les inclinaisons de la tête grâce aux organes à otolithes et aux canaux semi-circulaires. La modalité sonore, souvent reléguée à un rôle de second plan, apporte pourtant des informations sur la vitesse, notamment dans le cas de la conduite automobile. Enfin, le corps humain dispose également de capteurs proprioceptifs informant de la position des articulations et de l'étirement des muscles.

Une description anatomique de ces différents organes révèle qu'ils ne sont pas de simples capteurs et qu'ils réalisent un premier traitement de l'information avant de la faire parvenir au système nerveux central. Le cerveau fait alors émerger une sensation de mouvement propre cohérente et unique.

Le flux optique, correspondant au changement de l'image rétinienne au cours du temps, contient des informations sur la direction du déplacement ainsi que sa vitesse. Certains auteurs soutiennent même que le flux visuel peut suffire pour percevoir son déplacement dans l'environnement. Un mouvement visuel peut en effet provoquer à lui seul une sensation de mouvement propre : on appelle ce phénomène lavection. C'est le principe fondateur des simulateurs de conduite. Cependant, des études montrent que lavection n'émanerait pas de la seule modalité visuelle, mais plutôt d'une interaction multisensorielle, notamment entre les modalités visuelle et vestibulaire. Lavection viendrait alors compenser les déficiences du système vestibulaire, ce dernier étant inefficace à vitesse constante.

Les simulateurs de conduite sont de plus en plus utilisés de nos jours, aussi bien par les constructeurs automobiles que les institutions en charge de la sécurité routière. Pour les uns, il s'agit de répondre à des problématiques industrielles et commerciales, pour les autres l'enjeu est de mieux comprendre les situations accidentogènes afin de pouvoir les réduire. Dans les deux cas, le simulateur de conduite doit permettre à un conducteur réel de conduire en environnement virtuel. A cette fin, les différents organes participant à la perception du mouvement sont stimulés afin de recréer une sensation de mouvement la plus proche possible de celle vécue en conditions réelles.

Les simulateurs de conduite sont donc généralement pourvus d'un cockpit (partiel ou complet) permettant au conducteur d'interagir avec le volant et les pédales, d'un écran ou un visiocasque afin de visualiser l'environnement de conduite et d'enceintes restituant le son du véhicule et de l'environnement. Certains simulateurs, dits dynamiques, proposent également une restitution des accélérations et des vibrations, au moyen d'actionneurs électromécaniques, pneumatiques ou hydrauliques.

Si certains simulateurs avancés permettent une restitution sur toutes les modalités sensorielles liées à la perception du mouvement, ce n'est pas toujours le cas. Sur ces simulateurs, l'absence de restitutions sur une ou plusieurs modalités ou encore la fidélité relativement faible de la restitution peut entraîner une différence entre le mouvement perçu sur simulateur et le mouvement qui serait perçu en conditions réelles. Notamment, il est souvent reporté une sous-estimation de la vitesse, qui se traduit généralement par une conduite plus rapide. La validité perceptive du simulateur n'est alors plus suffisante pour certaines études de comportement du conducteur.

Pour tenter de « corriger » ce problème de vitesse perçue sur leur simulateur, une méthode a récemment vu le jour, consistant à modifier le champ de vision géométrique tout en maintenant le champ de vision réel constant. Nous avons choisi d'étudier de façon plus approfondie cette technique.

Une première étude expérimentale a permis de confirmer les résultats de la littérature sur un simulateur dynamique à écran cylindrique. Le facteur d'échelle visuelle (f_{EV}), défini comme le ratio entre le champ de vision géométrique (GFOV) et le champ de vision couvert par le simulateur (FOV) permet d'influer sur la vitesse perçue par le conducteur. Pour une tâche de reproduction de vitesse, nous avons montré que le f_{EV} a un impact significatif sur la vitesse perçue. Nous avons également montré que l'effet du f_{EV} est très linéaire et que son effet est proportionnel à la vitesse du véhicule simulé. Nous avons ainsi établi une relation entre la variation de vitesse perçue et le facteur d'échelle visuelle :

$$\Delta(\%) \text{ Vitesse perçue} = 68.4 (f_{EV} - 1)$$

Pour un réglage encore plus fin de la restitution de la vitesse sur un simulateur de conduite, on peut être amené à vouloir modifier dynamiquement le facteur d'échelle visuelle, c'est-à-dire le modifier pendant la conduite. Il serait ainsi possible de faire coïncider au mieux la vitesse perçue en conditions réelles et en conditions de simulation. Toutefois, ce changement dynamique du facteur d'échelle ne doit pas être perçu par le conducteur si on veut préserver l'immersion et la sensation de présence dans le simulateur.

Une deuxième étude expérimentale a permis d'estimer le seuil de perception du changement de facteur d'échelle visuelle, c'est-à-dire la vitesse de variation maximale du f_{EV} permettant de ne pas être perçue par le conducteur. Le seuil moyen mesuré sur un ensemble de 14 sujets est de $0,019 \text{ s}^{-1}$. De plus, en comparant plusieurs conditions, nous avons montré que ce seuil n'est pas affecté par la vitesse de déplacement mais qu'en revanche le sens de variation est un facteur significatif. Les sujets semblent en effet être plus précis pour la détection d'une augmentation du facteur d'échelle visuelle que pour une diminution. Le seuil moyen obtenu pour la détection d'une augmentation du f_{EV} est de $0,016 \text{ s}^{-1}$ et de $0,022 \text{ s}^{-1}$ pour une diminution.

7.2. Perspectives

La technique du facteur d'échelle visuelle semble donc être une technique permettant de corriger de façon subtile la sensation de vitesse perçue en simulation de conduite. Une étude de validation de l'apport de la technique du facteur d'échelle visuelle devrait cependant être entreprise. Cette étude aurait pour but de comparer les vitesses perçues en conduite réelle et en conduite simulée. Elle permettrait de valider qu'il est

possible de faire correspondre la vitesse perçue sur simulateur à la vitesse perçue sur simulateur grâce à la technique présentée dans cette thèse.

L'impact que la technique du facteur d'échelle visuelle peut avoir sur la présence du conducteur dans l'environnement de conduite simulé n'a pas été complètement étudié. Une étude avec un questionnaire de présence permettrait de valider l'influence du facteur d'échelle sur la présence et l'immersion du conducteur. Cette étude devra également faire conduire les sujets dans d'autres situations qu'une ligne droite, comme par exemple une prise de virage ou un suivi de véhicule. Cette étude permettrait de valider que la modification du facteur d'échelle visuelle n'influence pas le comportement du conducteur (mis à part pour la vitesse).

Durant la deuxième expérimentation, nous avons cherché à ce que les sujets ne détectent pas le changement de facteur d'échelle visuelle. Mais quelle est la sensation perçue lorsque ce changement est détecté ? Percevons-nous un monde qui se déforme ou percevons-nous une autre sensation ? Après quelques rapides tests, nous avons remarqué que le flux optique engendré par l'augmentation ou la diminution du facteur d'échelle sont des flux d'expansion ou de compression, semblables à ceux générés par un mouvement vers l'avant ou vers l'arrière. La sensation perçue lors d'un changement de facteur d'échelle visuelle pourrait alors être celle d'une accélération ou d'une décélération. Si tel était le cas, on pourrait alors utiliser le facteur d'échelle visuelle pour par exemple renforcer la restitution inertielle physique ou encore compenser les défauts de la restitution inertielle engendrés notamment par le retour en position neutre du système de restitution physique.

Bibliographie

Artz, Bruce, Larry Cathey, Peter Grant, Dan Houston, Jeff Greenberg, and Max Mariani. "The Design and Construction of the Visual Subsystem for VIRTTEX, the Driving Simulator at the Ford Research Laboratories." *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. Paris, 2001. 255-262.

Banton, Tom, Jeanine Stefanucci, Frank Durgin, Adam Fass, and Dennis Proffitt. "The perception of walking speed in a virtual environment." *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 14, no. 4 (2005): 394-406.

Bardy, B G, W H Warren, and B A Kay. "The role of central and peripheral vision in postural control during walking." *Perception & psychophysics* 61, no. 7 (1999): 1356-1368.

Bear, Mark F., Barry W. Connors, and Michael A. Paradiso. *Neurosciences - A la découverte du cerveau*. Editions Pradel, 2002.

Benson, A J, E C Hutt, and S F Brown. "Thresholds for the perception of whole body angular movement about a vertical axis." *Aviation Space and Environmental Medicine* 60, no. 3 (1989): 205-213.

Benson, A J, M B Spencer, and J R Stott. "Thresholds for the detection of the direction of whole-body, linear movement in the horizontal plane." *Aviation Space and Environmental Medicine* 57, no. 11 (1986): 1008-1096.

Berger, Daniel R. "Scene scaling during simulated forward accelerations: Are explicit size cues used?" Max Planck Institute for Biological Cybernetics, 2009.

Berthoz, A. *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, 1995.

Berthoz, A, and J Droulez. "Linear self-motion perception." In *Tutorials in motion perception*, by A H Wertheim, W A Wagenaar and H W Leibowitz, 157-199. Plenum, 1982.

Berthoz, A, B Pavard, and L R Young. "Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection) - Basic characteristics and visual-vestibular interactions." *Experimental Brain Research* 23, no. 5 (1975): 471-489.

Blaauw, G J. "Driving experience and task demands in simulator and instrumented car: a validation study." *Human Factors* 24, no. 4 (1982): 473-486.

Blakemore, Mark R, and Robert J Snowden. "The effect of contrast upon perceived speed: a general phenomenon?" *Perception* 28, no. 1 (1999): 33-48.

Borah, J, L R Young, and R E Curry. "Sensory mechanism modeling." USAF ASD, Air Force Human Resources Laboratory, 1978.

Bos, Jelte E, and Willem Bles. "Theoretical considerations on canal-otolith interaction and an observer model." *Biological Cybernetics* 86, no. 3 (2002): 191-207.

Bremmer, F, and M Lappe. "The use of optical velocities for distance discrimination and reproduction during visually simulated self motion." *Experimental Brain research* 127 (1999): 33-42.

Bringoux, L, S Schneider, V Nougier, G Dumas, P-A Barraud, and C Raphael. "Perception of slow pitch and roll body tilts in bilateral labyrinthine-defective subjects." *Neuropsychologia* 40, no. 4 (2002): 367-372.

Clark, B, and J D Stewart. "Comparison of three methods to determine thresholds for perception of angular acceleration." *American Journal of Psychology* 81, no. 2 (1968): 207-216.

Clifford, Colin W, Scott A Beardsley, and Lucia M Vaina. "The perception and discrimination of speed in complex motion." *Vision Research* 39 (1999): 2213-2227.

Crowell, J. A., and M. S. Banks. "Perceiving heading with different retinal regions and types of optic flow." *Perception & psychophysics* 53, no. 3 (1993): 325-337.

Curry, R, B Artz, L Cathey, P Grant, and J Greenberg. "Kennedy SSQ Results: fixed- vs. motion-based Ford simulators." *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. Paris, France, 2002. 289-300.

Cutting, J. E., and P. M. Vishton. *Perceiving layout and knowing distances: the integration, relative potency and contextual use of different information about depth*. Vol. 5: Perception of Space and Motion, in *Handbook of perception and Cognition.*, edited by W. Epstein and S. Rogers, 69-117. 1995.

Dagdelen, M. "Restitution des stimuli inertiels en simulation de conduite." Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2005.

Dagdelen, M, G Reymond, A Kemeny, M Bordier, and N Maïzi. "MPC based Motion Cueing Algorithm: Development and Application to the ULTIMATE Driving Simulator." *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. 2004. pages 221-234.

Dagdelen, M, J-C Berlioux, F Panerai, G Reymond, and A Kemeny. "Validation process of the ULTIMATE high-performance driving simulator." *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. Paris, France, 2006. 37-48.

de Winter, J C, S de Groot, M. Mulder, P. A. Wieringa, and J. Dankelman. "The search for higher fidelity in fixed-base driving simulation: six feedback systems evaluated." *Proceedings of Driving Simulation Conference DSC*. Monaco, 2008. 183-192.

Denton, Gordon G. "The influence of visual pattern on perceived speed." *Perception* 9, no. 4 (1980): 393-402.

Dichgans, J., and T. Brandt. *Visual vestibular interaction: effects on self-motion perception and in postural control*. Vol. 8, in *Perception, Handbook of sensory physiology*, edited by R. Held, H. Leibowitz and H. Teuber, 755-804. Springer, 1978.

Diels, C, and A M Parkes. "Geometric Field Of View Manipulations Affect Perceived Speed in Driving Simulators." *Proceedings of the Road Safety and Simulation Conference*. Paris, France, 2009.

Droulez, J., and C. Darlot. "The geometric and dynamic implications of the coherence constraints in threedimensional sensorimotor interactions." In *Attention and Performance*, edited by Marc Jeannerod, 495-562. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1989.

Ehrenstein, Walter H., and Addie Ehrenstein. "Psychophysical Methods." Chap. 43 in *Modern Techniques in Neuroscience Research*, edited by Uwe Windhorst and Hakan Johansson. Springer, 1999.

Enroth-Cugell, Christina, and John G. Robson. "Functional Characteristics and Diversity of Cat Retinal Ganglion Cells." *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 25 (1984): 250-267.

Fechner, Gustav T. *Elemente der Psychophysik*. Breitkopf & Härtel, 1860.

Filliard, N., E. Icart, J. L. Martinez, S. Gérin, F. Mérienne, and A. Kemeny. "Software assembly and open standards for driving simulation." *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. Paris, 2010. 99-108.

Filliard, Nicolas. "Cohérence des stimuli visuels et vestibulaires sur simulateur de conduite et en réalité virtuelle." Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2009.

Fuchs, Philippe. *Le Traité de la Réalité Virtuelle*. Presses de l'Ecole des Mines, 2006.

Gauduin, Benoît, and Patrick Boussard. "High Fidelity sound rendering for car driving simulators." *Proceedings of Driving Simulation Conference DSC*. Monaco, 2009. 283-294.

Gianna, C, S Heimbrand, and M Gresty. "Thresholds for detection of motion direction during passive lateral whole-body acceleration in normal subjects and patients with bilateral loss of vestibular function." *Brain Research Bulletin* 40, no. 5-6 (1996): 443-447.

Gibson, James J. *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1979.

—. *The perception of the visual world*. Houghton Mifflin, 1950.

—. *The senses considered as perceptual systems*. Houghton Mifflin, 1966.

Gibson, James J. "The visual perception of objective motion and subjective movement." *Psychological Review* 61, no. 5 (1954): 304-314.

Gibson, James J. "What gives rise to the perception of motion?" *Psychological Review* 75, no. 4 (1968): 335-346.

Gibson, James J., and Laurence E. Crooks. "A Theoretical Field-Analysis of Automobile-Driving." *The American Journal of Psychology* (University of Illinois Press) 51, no. 3 (1938): 453-471.

Graf, Werner, and François Klam. "Le système vestibulaire : anatomie fonctionnelle et comparée, évolution et développement." *Comptes Rendus Palevol* 5, no. 3-4 (2006): 637-655.

Groen, E. L., and W. Bles. "How to use body tilt for the simulation of linear self motion." *Journal of Vestibular Research* 14, no. 5 (2004): 375-385.

Groen, E. L., I. P. Howard, and B S Cheung. "Influence of body roll on visually induced sensations of self-tilt and rotation." *Perception* (Pion Ltd) 28, no. 3 (1999): 287-297.

Groen, Eric L., and Jelte E. Bos. "Identification of "Bad simulator motion"." 2008. 237-246.

Guerraz, Michel, Claire C. Gianna, Peter M. Burchill, Michael A. Gresty, and Adolfo M. Bronstein. "Effect of visual surrounding motion on body sway in a three-dimensional environment." *Perception and Psychophysics* 63, no. 1 (2001): 47-58.

Hall, J R. "The need for platform motion in modern piloted flight training simulators." Technical Memorandum, 1989.

Hamann, C, U Schonfeld, and A H Clarke. "Otolith-ocular reflex in linear acceleration of low frequencies." *HNO* 49, no. 10 (2001): 818-824.

Harris, Laurence R., Michael Jenkin, and Daniel C. Zikovitz. "Visual and non-visual cues in the perception of linear self motion." *Experience Brain Research* 135 (2000): 12-21.

Heerspink, Harm M., Walter R. Berkouwer, Olaf Stroosma, M. M. van, Max Mulder, and J. A. Mulder. "Evaluation of Vestibular Thresholds for Motion Detection in the SIMONA Research Simulator." 2005. 1212-1231.

Heilig, M L. Sensorama Simulator. USA Patent 3050870. August 28, 1962.

Jamson, A. H. "Driving Simulator Validity: issues of Field of View and Resolution." 2000. 57-64.

Kaplan, E., and E. Benardete. "The dynamics of primate retinal ganglion cells." *Progress in brain research* 134 (2001): 17-34.

Kemeny, Andras, and Francesco Panerai. "Evaluating perception in driving simulation experiments." *TRENDS in Cognitive Science* 7, no. 1 (2003): 31-37.

Kennedy, Robert S., Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lilienthal. "Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness." (Taylor & Francis) 3, no. 3 (1993): 203-220.

Klam, François. "Etude de la représentation de l'espace tridimensionnel dans le cortex pariétal chez le macaque vigile : approche électrophysiologique et modélisation." Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2003.

Lappe, M, F Bremmer, and A V van den Berg. "Perception of self-motion from visual flow." *Trends in Cognitive Sciences* 3, no. 9 (1999): 329-336.

Lappe, Markus, Michael Jenkin, and Laurence R. Harris. "Travel distance estimation from visual motion by leaky path integration." *Experimental Brain research* 180 (2007): 35-48.

Larish, John F., and John M. Flach. "Sources of Optical Information Useful for Perception of Speed of Rectilinear Self-Motion." *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 16, no. 2 (1990): 295-302.

Lee, David N. "A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision." *Perception* 5 (1976): 437-459.

Longuet-Higgins, H. C., and K. Prazdny. "The interpretation of a moving retinal image." *Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Science* 208 (1980): 385-397.

McLane, Robert C., and Walter W. Wierwille. "The Influence of Motion and Audio Cues on Driver Performance in an Automobile Simulator." *Human Factors* 17, no. 5 (1975): 488-501.

Mestre, Daniel R. "Visual factors in car driving." In *Human factors for the highway engineer*, by Ray Fuller and Jorge A Santos, 99-114. 2002.

- Mittelstaedt, H. "Somatic graviception." *Biological Psychology*, no. 42 (1996): 53-74.
- Mourant, R R, N Ahmad, B K Jaeger, and Y Lin. "Optic flow and geometric field of view in a driving simulator display." *Displays* 28 (2007): 145-149.
- NADS. "National Advanced Driving Simulator Overview." The University of Iowa, 2010.
- Neimer, Joëlle. "Cinétoses ferroviaires provoquées par la pendulation active des rames : approche différentielle." Université Pierre Mendès-France, Grenoble, 2002.
- Oman, Charles M. "Motion sickness: a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory." *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 68, no. 2 (1990): 294-303.
- Ono, Mika E., Josée Rivest, and Hiroshi Ono. "Depth Perception as a Function of Motion parallax and Absolute-Distance Information." *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 12, no. 3 (1986): 331-337.
- Ooi, Teng L., Bing Wu, and Zijiang J. He. "Distance determined by the angular declination below the horizon." *Nature* 414 (2001): 197-200.
- Paillé, Damien. "Influence de la taille du champ de vision sur la perception des distances en environnement virtuel." Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2005.
- Palmisano, Stephen, and Amy Y. Chan. "Jitter and size effects on vection are immune to experimental instructions and demands." *Perception* (Pion Ltd) 33, no. 8 (2004): 987-1000.
- Panerai, F, J Droulez, J-M Kelada, A Kemeny, E Balligand, and B Favre. "Speed and safety distance control in truck driving: comparison of simulation and real-world environment." *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. 2001. pages 91-108.
- Parrish, R V, and D J Martin. "Comparison of a linear and a nonlinear washout for motion simulator utilizing objective and subjective data from ctdl transport landing approach." Rapport technique, NASA, 1976.
- Parrish, R V, J E Dieudonne, and D J Martin. "Coordinated adaptive washout for motion simulators." *Journal of Aircraft*, 1975: 12(1) : pages 44-50.
- Parrish, R. V., and D. J. Martin. "Comparison of a linear and a non linear washout for motion simulator utilizing objective and subjective data from transport landing approach." NASA, 1976.
- Pavard, B., and A. Berthoz. "Linear acceleration modifies the perceived velocity of a moving visual scene." *Perception* (Pion Ltd) 6, no. 5 (1977): 529-540.
- Pinto, Maria. "Les interactions multisensorielles dans la perception du mouvement longitudinal. Implications pour les simulateurs de conduite." Université Pierre Mendès-France, Grenoble, 2007.
- Post, Robert B. "Circular vection is independent of stimulus eccentricity." *Perception* (Pion Ltd) 17, no. 6 (1988): 737-744.
- Pretto, P, M Vidal, and A Chatziastros. "Why fog increases the perceived speed." *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. 2008. 223-236.

Reason, James T., and J. J. Brand. *Motion Sickness*. Academic Press, 1975.

Reid, L D, and M A Nahon. "Flight simulation motion base drive algorithm : part 1 - developing and testing the equations." Rapport technique, University of Toronto, 1985.

Reid, L D, and M A Nahon. "Simulator Motion Drive Algorithms: a designer's perspective." *Journal of Guidance*, 1988: 13 (2): pages 356-362.

Repa, B S, P M Leucht, and W Wierwille. "The effect of simulator motion on driver performance." *Society of Automobile Engineers*, 1982.

Reymond, G, A Kemeny, J Droulez, and A Berthoz. "Role of lateral acceleration in curve driving: driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator." *Human Factors* 43, no. 3 (2001): 483-495.

Reymond, G, and A Kemeny. "Motion cueing in the Renault driving simulator." *Vehicle System Dynamics* 34 (2000): 249-259.

Reymond, G., A. Heidet, M. Canry, and A. Kemeny. "Validation of Renault's dynamic simulator for Adaptive Cruise Control experiments." 2000.

Reymond, G., A. Kemeny, J. Droulez, and A. Berthoz. "Role of lateral acceleration in curve driving: driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator." *Human factors* 43, no. 3 (2001): 483-495.

Riecke, Bernhard E., Jörg Schulte-Pelkum, Marios N. Avraamides, Markus Von Der, and Heinrich H. Bülthoff. "Cognitive factors can influence self-motion perception (vection) in virtual reality." *ACM Transactions on Applied Perception (ACM)* 3, no. 3 (2006): 194-216.

Robinson, D. A. "Linear addition of optokinetic and vestibular signals in the vestibular nucleus." *Experimental Brain Research* 30, no. 2 (1977): 447-450.

Rodenburg, M, H P Stassen, and A J Maas. "The threshold of perception of angular acceleration as a function of duration." *Biological Cybernetics* 39, no. 3 (1981): 223-226.

Rogers, Brian, and Maureen Graham. "Motion parallax as an independent cue for depth perception." *Perception* 8, no. 2 (1979): 125-134.

Schimdt, S F, and B Conrad. "Motion drive signals for piloted flight simulators." Rapport technique, NASA, 1970.

Sekuler, Robert, and Randolph Blake. *Perception*. 4th edition. McGraw-hill Professional, 2001.

Siegler, I, G Reymond, A Kemeny, and A Berthoz. "Sensorimotor integration in a driving simulator: contributions of motion cueing in elementary driving tasks." *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. Sophia Antipolis (Nice), France, 2001. 21-32.

Sinacori, J B. "A practical approach to motion simulation." *Proceedings of the AIAA Visual and Motion Simulation Conference*. 1973.

Sivan, R, J Ish-Shalom, and J K Huang. "An optimal control approach to the design of moving flight simulators." *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1982: 12(6) : pages 818-827.

Snowden, Robert J., Nicola Stimpson, and Roy A. Ruddle. "Speed perception fogs up as visibility drops." *Nature* 392 (1998): 450.

Stone, Leland S., and Peter Thompson. "Human Speed Perception is Contrast Dependent." *Vision Research* 32, no. 8 (1992): 1335-1549.

Tarita-Nistor, Luminita, Esther G. Gonzalez, Ashley J. Spigelman, and Martin J. Steinbach. "Linearvection as a function of stimulus eccentricity, visual angle, and fixation." *Journal of Vestibular Research* 16, no. 6 (2006): 265-272.

Telban, R, and F Cardullo. "A nonlinear human centered approach to motion cueing with neurocomputing solver." *AIAA*, 2002.

Thompson, Peter, Kevin Brooks, and Stephen T. Hammett. "Speed can go up as well as down at low contrast: Implications for models of motion perception." *Vision research* 46 (2006): 782-786.

van Egmond, A. A., J. J. Groen, and L. B. Jongkees. "The mechanics of the semicircular canal." *The Journal of physiology* 110, no. 1-2 (1949): 1-17.

von Békésy, Georg. "A New Audiometer." *Acta Oto-Laryngologica* 35, no. 5 (1947): 411-422.

von Holst, Erich, and Horst Mittelstaedt. "Das Reafferenzprinzip." *Naturwissenschaften* (Springer Berlin / Heidelberg) 37, no. 20 (1950): 464-476.

Waespe, W., and V. Henn. "Neuronal activity in the vestibular nuclei of the alert monkey during vestibular and optokinetic stimulation." *Experimental Brain Research* 27, no. 5 (1977): 523-538.

Warren, Rik, and Alexander H. Wertheim. *Perception and Control of self-motion*. Edited by Rik Warren and Alexander H. Wertheim. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1990.

Warren, William H., and Kenneth J. Kurtz. "The role of central and peripheral vision in perceiving the direction of self-motion." *Perception and Psychophysics* 51, no. 5 (1992): 443-454.

Watanabe, M., and R. W. Rodieck. "Parasol and midget ganglion cells of the primate retina." *The Journal of comparative neurology* 289, no. 3 (1989): 434-454.

Watson, G. "A Synthesis of Simulator Sickness Studies Conducted in a High-Fidelity Driving Simulator." *Proceedings of the Driving Simulation Conference*. 2000. pages 69-78.

Weiss, Yair, Eero P. Simoncelli, and Edward H. Adelson. "Motion illusions as optimal percepts." *nature neuroscience* 5, no. 6 (2002): 598-604.

Wentink, Mark, Jelte Bos, Eric Groen, and Ruud Hosman. "Development of the Motion Perception Toolbox." *AIAA*, 2006.

Wertheim, A. H. "Motion perception during self-motion: the direct versus inferential controversy revisited." *Behavioral and Brain Sciences* 17, no. 2 (1994): 293-355.

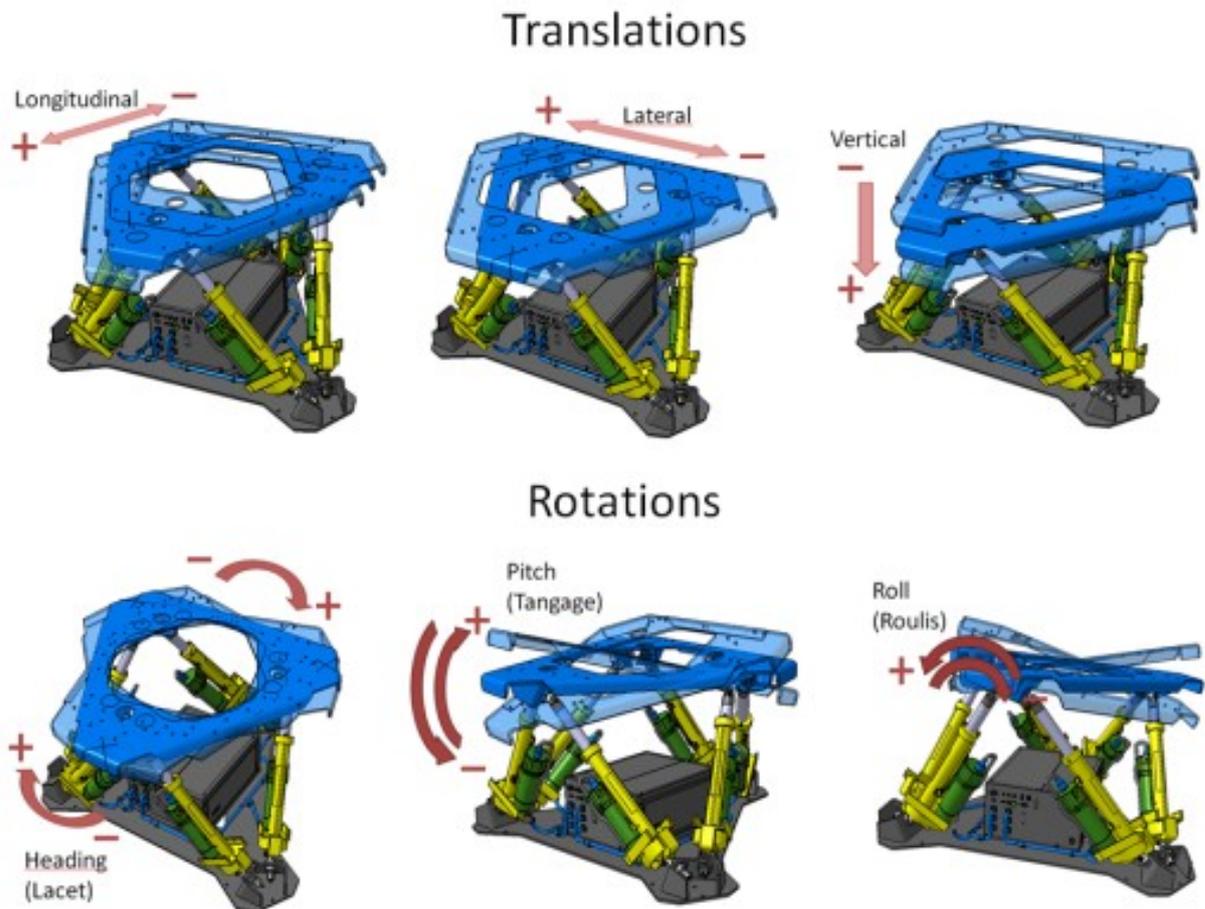
Wexler, Mark, Francesco Panerai, Ivan Lamouret, and Jacques Droulez. "Self-motion and the perception of stationary objects." *Nature* 409 (2001): 85-88.

Wierwille, W, J Casali, and B S Repa. "Driver steering reaction time t abrupt onset crosswinds as measured in a moving base driving simulator." *Human Factors*, 1983: 25(1) : pages 103-116.

Wright, W. Geoffrey, Paul DiZio, and James R. Lackner. "Perceived self-motion in two visual contexts: Dissociable mechanisms underlie perception." *Journal of Vestibular Research* 16, no. 1 (2006): 23-28.

Annexe A Cinématique inverse d'une plate-forme parallèle de type Gough-Stewart (6 DDL)

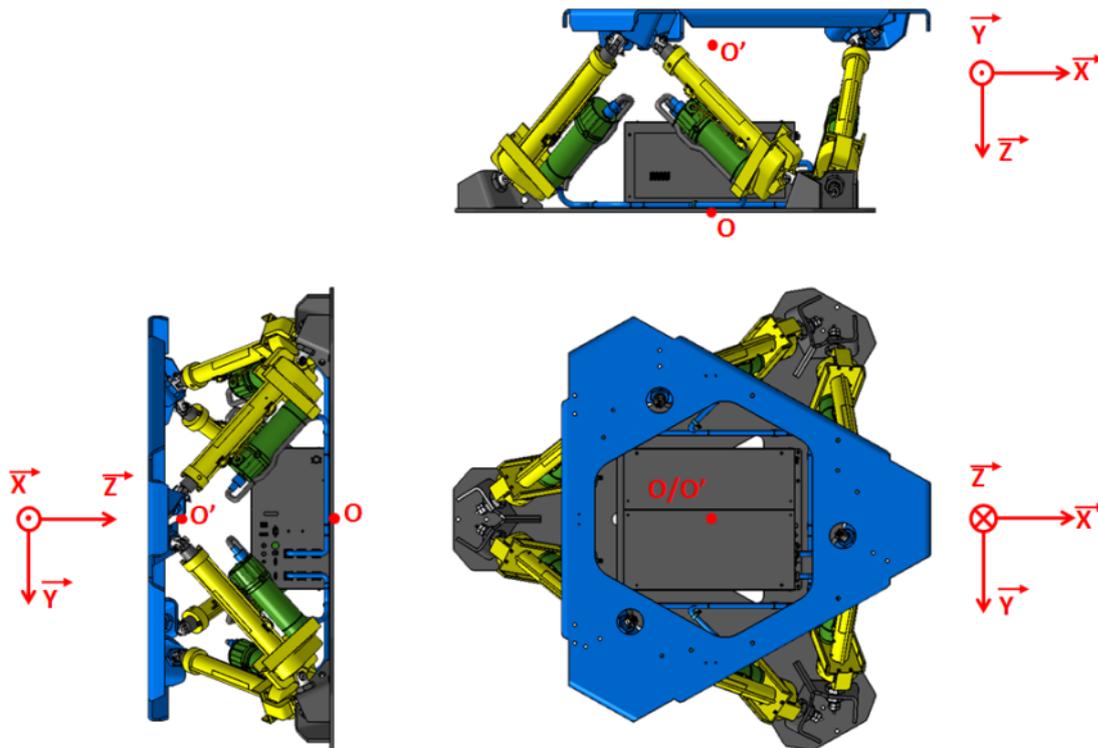
Une plate-forme parallèle de type Gough-Stewart possède 6 degrés de liberté (DDL) : 3 en translation et 3 en rotation. La figure suivante présente ces 6 degrés de liberté.



Le calcul de cinématique inverse consiste à déterminer la loi donnant les longueurs des vérins en fonction de la position souhaitée de la plate-forme. Il faut donc en premier lieu paramétrer cette position : 6 paramètres sont nécessaires car il y a 6 degrés de liberté.

Les paramètres x , y , z correspondent respectivement aux déplacements longitudinaux, latéraux et verticaux, en millimètres.

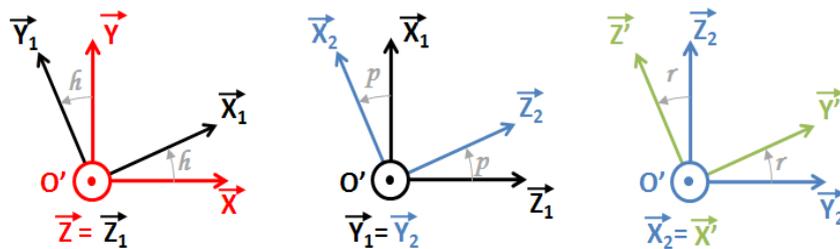
Les paramètres h , p , r correspondent respectivement aux rotations de lacet (heading), tangage (pitch) et roulis (roll), en radians. Les rotations n'étant pas commutatives, l'ordre des rotations est lacet, tangage puis roulis.



Le repère $\mathcal{R}(O, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ est lié à la table inférieure de la plate-forme, et le repère $\mathcal{R}'(O', \vec{X}', \vec{Y}', \vec{Z}')$ est lié à la table supérieure. Les translations pilotées x , y et z sont celles du point O' par rapport à sa position initiale dans le repère \mathcal{R} . La position initiale du point O' est telle que $\overrightarrow{OO'} = -589.28 \vec{Z}$.

On a donc à chaque instant $\overrightarrow{OO'} = x \vec{X} + y \vec{Y} + (z - 589.28) \vec{Z}$

Les rotations h , p et r se font autour du point O' . Pour effectuer le changement de repère de \mathcal{R} à \mathcal{R}' , on utilise 2 repères intermédiaires \mathcal{R}_1 et \mathcal{R}_2 définis comme suit :



On a donc les matrices de rotation:

$$\mathcal{M}_{\mathcal{R}' \rightarrow \mathcal{R}_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & -\sin r \\ 0 & \sin r & \cos r \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{M}_{\mathcal{R}_2 \rightarrow \mathcal{R}_1} = \begin{pmatrix} \cos p & 0 & \sin p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin p & 0 & \cos p \end{pmatrix}$$

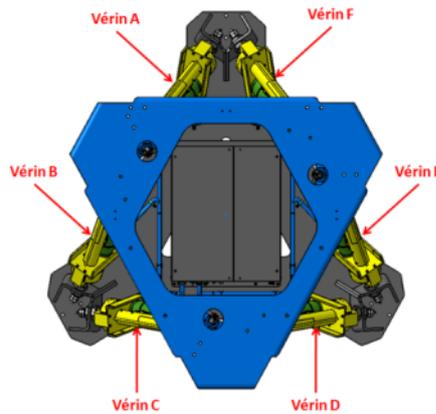
$$\mathcal{M}_{\mathcal{R}_1 \rightarrow \mathcal{R}} = \begin{pmatrix} \cos h & -\sin h & 0 \\ \sin h & \cos h & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

D'où :

$$\mathcal{M}_{\mathcal{R}' \rightarrow \mathcal{R}} = (\mathcal{M}_{\mathcal{R}' \rightarrow \mathcal{R}_2}) \cdot (\mathcal{M}_{\mathcal{R}_2 \rightarrow \mathcal{R}_1}) \cdot (\mathcal{M}_{\mathcal{R}_1 \rightarrow \mathcal{R}})$$

$$\mathcal{M}_{\mathcal{R}' \rightarrow \mathcal{R}} = \begin{pmatrix} \cos p \cdot \cos h & -\cos p \cdot \sin h & \sin p \\ \sin r \cdot \sin p \cdot \cos h + \cos r \cdot \sin h & -\sin r \cdot \sin p \cdot \sin h + \cos r \cdot \cos h & -\sin r \cdot \cos p \\ -\cos r \cdot \sin p \cdot \cos h + \sin r \cdot \sin h & \cos r \cdot \sin p \cdot \sin h + \sin r \cdot \cos h & \cos r \cdot \cos p \end{pmatrix}$$

On nomme les vérins de A à F. On appelle A_1, B_1, C_1, D_1, E_1 et F_1 les bases des vérins (sur la table inférieure) et A_2, B_2, C_2, D_2, E_2 et F_2 les extrémités des vérins (sur la table supérieure).



On connaît les coordonnées des bases des vérins dans le repère \mathcal{R} et les coordonnées des extrémités des vérins dans le repère \mathcal{R}' . Il suffit ensuite d'effectuer un changement de

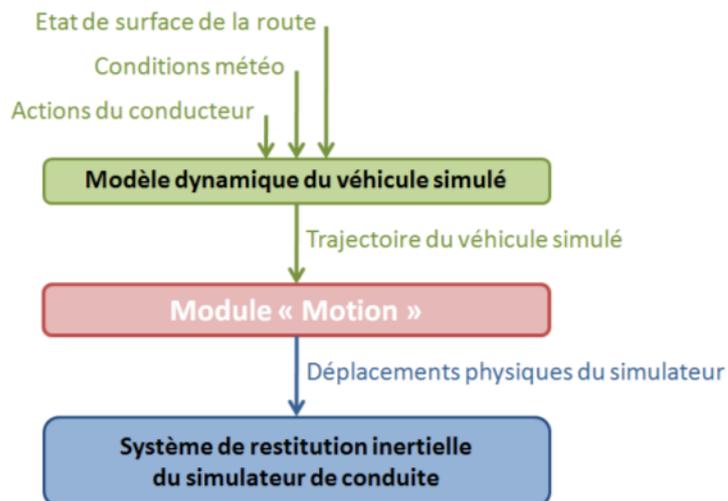
repère pour les passer dans le repère \mathcal{R} . Par exemple si on connaît $A_2 = \begin{pmatrix} A_{2x} \\ A_{2y} \\ A_{2z} \end{pmatrix}_{/\mathcal{R}'}$, on a

$$\text{alors : } A_2 = \left[\mathcal{M}_{\mathcal{R}' \rightarrow \mathcal{R}} \cdot \begin{pmatrix} A_{2x} \\ A_{2y} \\ A_{2z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x \\ y \\ z - 589.28 \end{pmatrix} \right]_{/\mathcal{R}}$$

Pour avoir la longueur des vérins, il suffit alors de calculer les normes des vecteurs (par exemple $\|\overrightarrow{A_1 A_2}\|$ pour le vérin A).

Annexe B Pilotage de la plate-forme MOOG

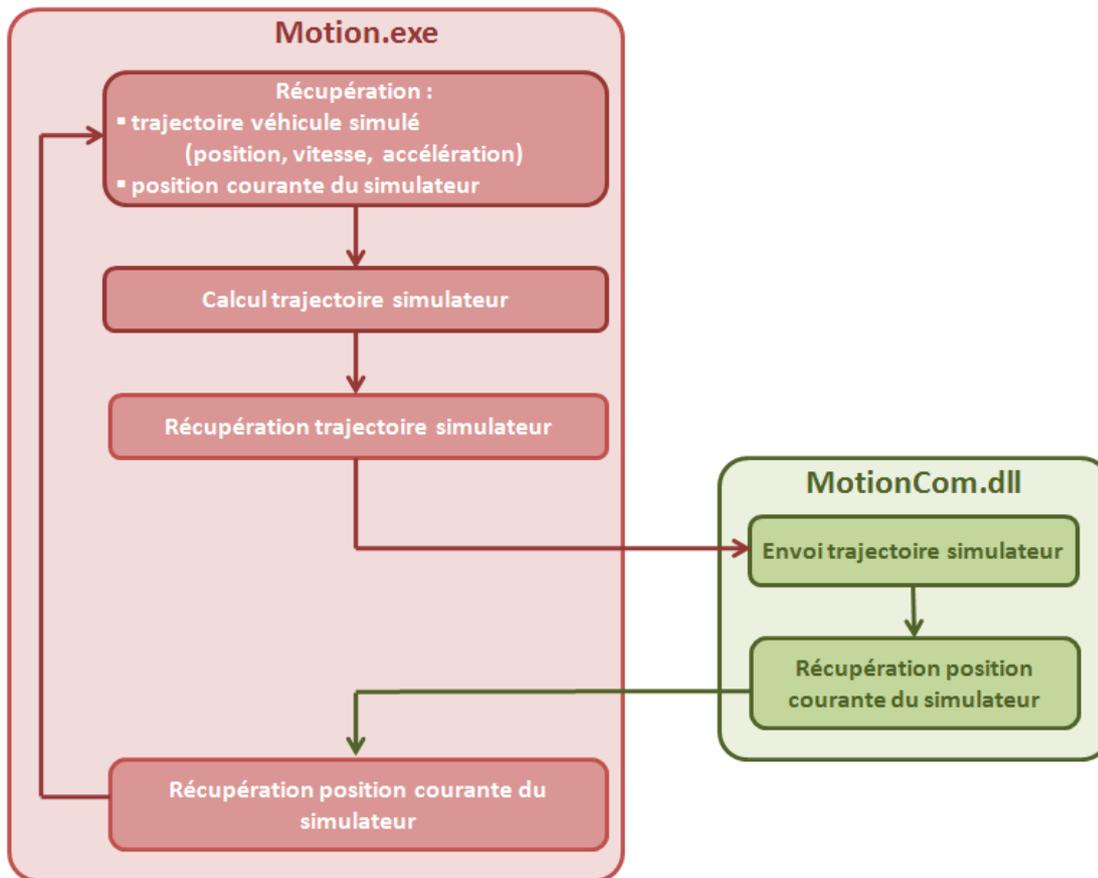
Le module « Motion » du logiciel SCANeR© réalise l'interface entre le modèle dynamique de véhicule, calculant la trajectoire du véhicule simulé, et le pilotage des déplacements physiques du simulateur. Le diagramme suivant illustre cet interfaçage.



Comme on peut le constater, c'est dans ce module « Motion » qu'est réalisée l'implémentation de la stratégie de commande (voir 4.3.4). Or, en tant que laboratoire de recherche, nous souhaitons pouvoir faire des études sur la restitution inertielle, et donc avoir la possibilité de modifier facilement la stratégie de commande utilisée. Cependant, comme nous n'avons pas le code source du logiciel SCANeR© (propriété de Renault et d'Oktal), nous avons demandé à produire avec eux une solution permettant de répondre à notre besoin tout en maintenant la sécurité relative à la confidentialité du code source de SCANeR©.

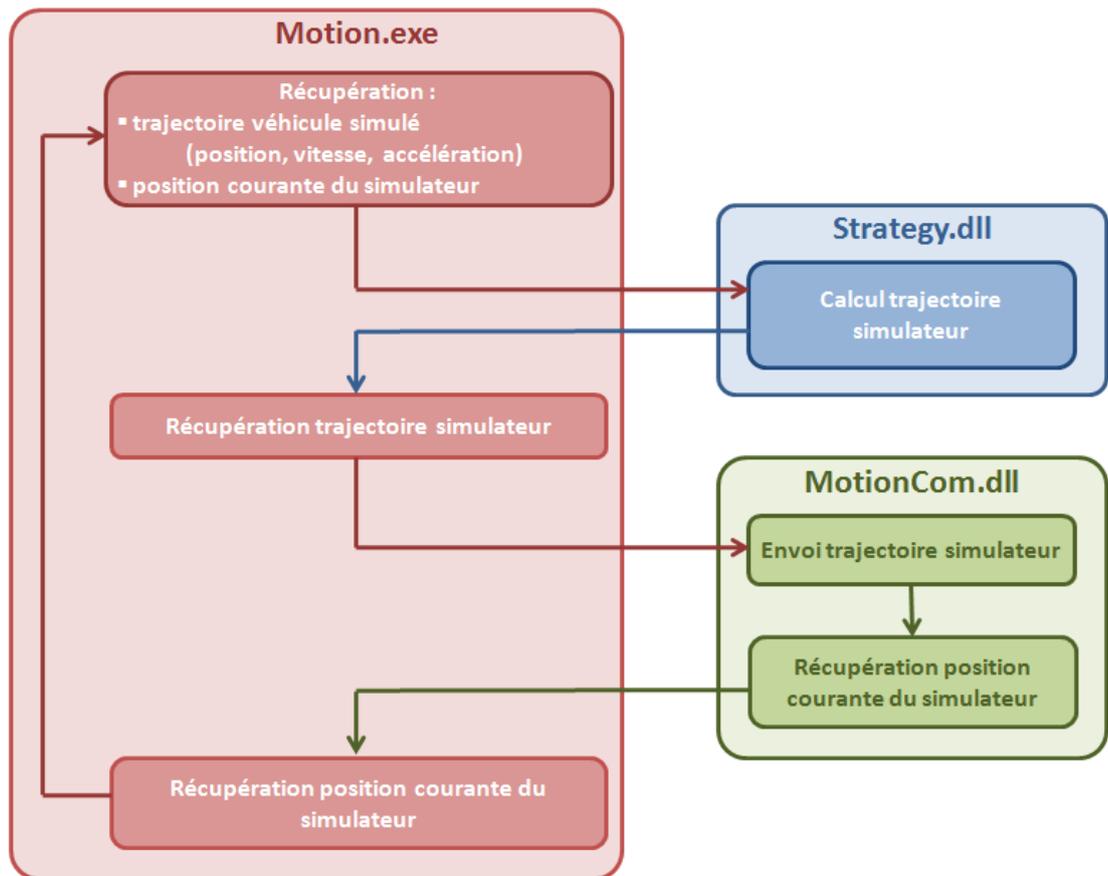
D'autre part, un travail de développement devait également être fait au niveau de la communication avec la plate-forme MOOG 2000E, car c'était la première fois que ce modèle de restituteur inertielle était utilisé avec SCANeR©. Cette annexe explique dans les grandes lignes le travail que j'ai effectué dans les locaux d'Oktal à Aix-en-Provence pour répondre à ces 2 problématiques.

Le module « Motion » utilise des DLL (*Dynamic Link Library*) dont on configure les noms dans des fichiers de configuration, pour effectuer certaines parties du traitement. Ainsi, il est possible de passer d'une configuration de simulateur à une autre simplement en changeant la DLL utilisée. La figure suivante illustre, de façon simpliste, les actions effectuées par le module « Motion » et par les DLL pendant la phase de conduite (c'est-à-dire hors phase d'initialisation, phase d'erreur et phase d'arrêt).



B.1. Stratégie de commande

Comme on peut le voir dans la figure précédente, il n'est pas possible de changer la stratégie de commande à proprement parler (« Calcul trajectoire simulateur ») sans avoir accès au code source du module « Motion » et sans avoir à recompiler ce dernier après modification. Pendant ma période dans les locaux d'Oktal, mon premier travail a donc été d'externaliser ce calcul dans une DLL (« Strategy.dll »). Ainsi, sans avoir à recompiler le module « Motion » et sans avoir accès au code source, il nous a donc été possible de changer le calcul de la stratégie de commande tout simplement en changeant la DLL. La figure précédente est donc devenue celle présentée ci-dessous.

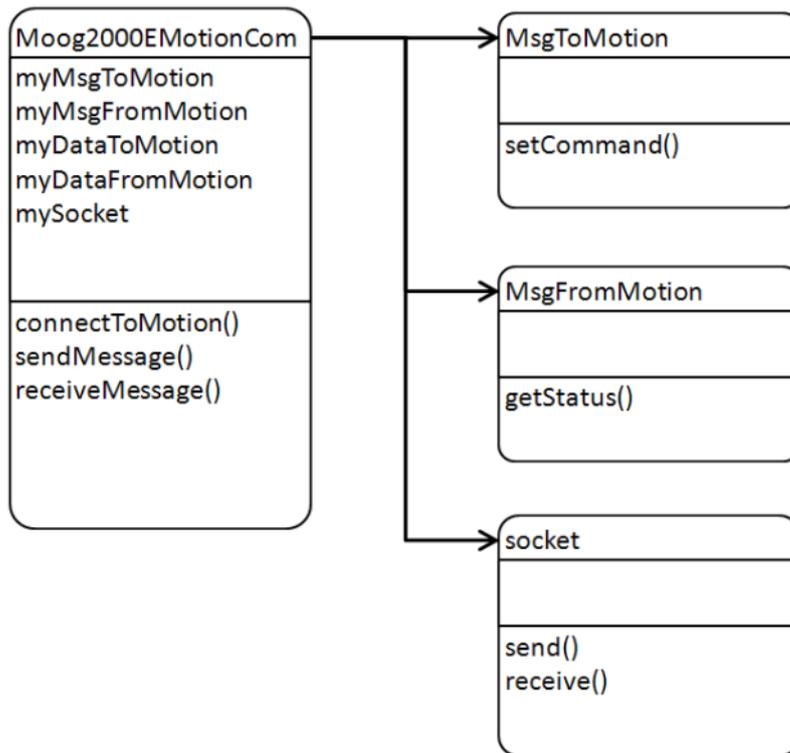


B.2. Commande plate-forme

Le deuxième travail que j'ai réalisé était le contrôle de la plate-forme MOOG 2000E du simulateur SAAM. En effet, ce type de plate-forme n'avait jamais été utilisé jusqu'alors avec le logiciel SCANer®. J'ai donc développé une DLL calquée sur celles permettant de piloter d'autres types de plate-forme.

La communication avec la MOOG 2000E se fait en UDP. Le contrôleur envoie un message de 8 mots de 4 bits chacun (soit 32 bits en tout) : un mot de commande, 6 mots pour la position à atteindre selon les 6 degrés de liberté, et le 8^{ème} mot n'est pas utilisé (spare). La plate-forme répond alors par un message de 10 mots de 4 bits chacun (soit 40 bits en tout) : 3 mots contenant les informations d'état de la plate-forme, 6 mots pour la position de la plate-forme selon les 6 degrés de liberté, et le 10^{ème} mot n'est pas utilisé (spare).

La figure suivante donne le diagramme UML (très) simplifié du code développé pour piloter la plate-forme.



Lors de l'initialisation (« connectToMotion() »), la DLL crée un socket (« mySocket ») de communication avec la plate-forme. Puis, lors du fonctionnement « normal », à chaque boucle de temps :

- les données calculées par la stratégie de commande (« myDataToMotion ») sont mises à jour ;
- ces données sont formatées pour pouvoir être envoyées à la plate-forme (fonction « setCommand() » de « myMsgToMotion ») ;
- les données sont envoyées à la plate-forme (fonction « sendMessage() » qui fait appel à la fonction « send() » de « mySocket ») ;
- les données renvoyées par la plate-forme sont récupérées (fonction « receiveMessage() » qui fait appel à la fonction « receive() » de « mySocket ») ;
- ces données sont alors retranscrites (fonction « getStatus () » de « myMsgFromMotion »)...
- ... et mises à jour (« myDataFromMotion ») pour pouvoir être récupérées par le reste du programme.

Annexe C Shader de correction d'image

Voici le code du *shader* utilisé sur le simulateur SAAM pour déformer l'image en fonction du point de vue. Ce *shader* est donné en HLSL (*High Level Shader Language*).

Les commentaires apparaissent en vert et aident à la compréhension du *shader*. Toutefois, pour plus d'informations, se référer à la partie 6.3.

```
/*
// Déclaration de la structure pour le vertex shader
*/
struct VSOut
{
    float4 pos : POSITION;
    float2 tex0 : TEXCOORD0;
};

/*
// vertex shader
// Rien de particulier n'est fait
*/
VSOut Transform2d(
    float3 Pos : POSITION,
    float2 Tex0 : TEXCOORD0
)
{
    VSOut output = (VSOut)0;

    output.pos = float4(Pos, 1);
    output.tex0 = Tex0;

    return output;
}

/*
// Récupération et « sampling » de l'image de la caméra
*/
texture2D image : TEXTURE0;
sampler g_samSrcColor = sampler_state
{
    Texture = <image>;
    MinFilter = LINEAR;
    MagFilter = LINEAR;
    AddressU = CLAMP;
    AddressV = CLAMP;
};

/*
// Déclaration des points E_ref et E_pos, correspondants respectivement
// au point de vue de référence pour la déformation statique, et au point
// de vue courant
// Les valeurs de E_ref et E_pos sont des données d'entrée du shader.
*/
float3 E_ref = float3(0.0,0.0,0.0);
float3 E_pos = float3(0.0,0.0,0.0);

/*
// Déclaration de la variable face, indiquant sur quelle face de l'écran on est.
// 1 => face de gauche
// 2 => face du milieu
// 3 => face de droite
// La valeur de face est une donnée d'entrée du shader.
*/
int face = 0;

/*
```

```

// Déclaration et définition de la variable R, correspondant à la valeur en mètres
// du rayon de l'écran cylindrique
*/
static float R = 1.9;

/*
// Définition du Pixel Shader pour la déformation de l'image
*/
float4 WarpingShader( float2 Tex : TEXCOORD0 ) : COLOR0
{
    /*
    // Déclaration et définition de x_0 et y_0, les coordonnées du point M
    */
    float x_0 = Tex.x;
    float y_0 = Tex.y;

    /*
    // Déclaration et définition de Q, Svector, Tvector et Uvector, définissant
    // le plan de projection de la caméra.
    */
    float3 Q;
    float3 Svector;
    float3 Tvector;
    float3 Uvector;

    /*
    // Les valeurs de Q, Svector, Tvector et Uvector dépendent de la face
    // sur laquelle on se trouve
    */
    if (face == 1) // si on est sur la face de gauche
    {
        Q      = float3 ( -1.834525, 2.28, 0.491 );
        Svector = float3 ( 1.148895, 0.0, 1.280015 );
        Tvector = float3 ( 0.0, -1.39, 0.0 );
        Uvector = float3 ( Svector.y*Tvector.z - Svector.z*Tvector.y,
                          Svector.z*Tvector.x - Svector.x*Tvector.z,
                          Svector.x*Tvector.y - Svector.y*Tvector.x );
    }
    else
    {
        if (face == 3) // si on est sur la face de droite
        {
            Q      = float3 ( 0.610889, 2.28, 1.7987 );
            Svector = float3 ( 1.224086, 0.0, -1.3074 );
            Tvector = float3 ( 0.0, -1.39, 0.0 );
            Uvector = float3 ( Svector.y*Tvector.z - Svector.z*Tvector.y,
                              Svector.z*Tvector.x - Svector.x*Tvector.z,
                              Svector.x*Tvector.y - Svector.y*Tvector.x );
        }
        else // si on est sur la face du milieu (ou dans les autres cas)
        {
            Q      = float3 ( -0.8175, 2.28, 1.715 );
            Svector = float3 ( 1.635, 0.0, 0.0 );
            Tvector = float3 ( 0.0, -1.39, 0.0 );
            Uvector = float3 ( 0.0, 0.0, -1.0 );
        }
    }

    /*
    // Calcul du point M
    */
    float3 M = Q + x_0*Svector + y_0*Tvector;

    /*
    // Calcul du point N
    */
    float3 ErefM = M - E_ref;
    float A = ErefM.x / ErefM.z;
    float B = (E_ref.x/R) - ((ErefM.x*E_ref.z)/(R*ErefM.z));
    float cosTheta;
    // cosTheta est solution d'une équation du second degré :
    // il y a donc 2 valeurs possibles : cosTheta1 et cosTheta2
    float cosTheta1 = (- A*B + sqrt(A*A-B*B+1))/(A*A+1);
    float cosTheta2 = (- A*B - sqrt(A*A-B*B+1))/(A*A+1);

```

```

// On retiendra pour cosTheta la valeur positive.
if (cosTheta1 > 0)
{
    // Si cosTheta1 est positif, alors c'est la bonne solution
    cosTheta = cosTheta1;
}
else
{
    // Sinon, c'est cosTheta2 la bonne solution
    cosTheta = cosTheta2;
}
float sinTheta = A*cosTheta + B;
float3 N = float3( R*sinTheta,
                 E_ref.y + (ErefM.y/ErefM.x)*(R*sinTheta - E_ref.x),
                 R*cosTheta );

/*
// Calcul du point P
*/
float3 QE = E_pos - Q;
float3 EN = N - E_pos;
float uQE = (Uvector.x)*(QE.x) + (Uvector.y)*(QE.y) + (Uvector.z)*(QE.z);
float uEN = (Uvector.x)*(EN.x) + (Uvector.y)*(EN.y) + (Uvector.z)*(EN.z);
float k = - (uQE/uEN);
float3 QP = QE + k*EN;
float normS2 = (Svector.x)*(Svector.x) + (Svector.y)*(Svector.y) + (Svector.z)*(Svector.z);
float normT2 = (Tvector.x)*(Tvector.x) + (Tvector.y)*(Tvector.y) + (Tvector.z)*(Tvector.z);
float2 newTex;
// newTex correspond aux coordonnées de texture du point P
newTex.x = ( (Svector.x) * (QP.x) + (Svector.y) * (QP.y) + (Svector.z) * (QP.z) ) / normS2 ;
newTex.y = ( (Tvector.x) * (QP.x) + (Tvector.y) * (QP.y) + (Tvector.z) * (QP.z) ) / normT2 ;

/*
// Avant d'affecter au pixel courant la couleur du point P, on doit d'abord vérifier
// que ce pixel P est bien dans l'image, c'est-à-dire que ses coordonnées de texture
// sont bien comprises entre 0 et 1.
// Si le point P est en-dehors de l'image, alors on affectera la couleur errorColor
// au pixel courant.
*/

float4 errorColor = float4 (0.0,1.0,0.0,1.0); // errorColor correspond à du vert

/*
// Déclaration et définition de la variable isOut.
// isOut est instancié à false, c'est-à-dire qu'on fait l'hypothèse que P est dans l'image.
*/
bool isOut = false;

/*
// On teste la première coordonnée
*/
if (newTex.x > 1.0)
{
    isOut = true;
}
else
{
    if (newTex.x < 0.0)
    {
        isOut = true;
    }
}

/*
// On teste la deuxième coordonnée
*/
if (newTex.y > 1.0)
{
    isOut = true;
}
else
{
    if (newTex.y < 0.0)
    {

```

```
        isOut = true;
    }
}

/*
// Si le point P n'est pas en-dehors de l'image, alors on affecte sa couleur
// au pixel courant.
// Sinon, on affecte la couleur errorColor.
*/
if (isOut == false)
{
    return tex2D( g_samSrcColor, newTex.xy);
}
else
{
    return errorColor ;
}
}

/*
// On définit la technique « Warping », qui assemble le vertex shader
// et le pixel shader qui ont été créés.
*/
technique Warping
{
    pass p1
    {
        VertexShader = compile vs_1_1 Transform2d();
        PixelShader = compile ps_2_0 WarpingShader();
    }
}
```


FACTEUR D'ECHELLE VISUELLE POUR LA RESTITUTION DE LA PERCEPTION DE VITESSE EN SIMULATION DE CONDUITE AUTOMOBILE

RESUME : Percevoir sa vitesse est une tâche importante que le conducteur doit réaliser constamment pendant la conduite pour contrôler son véhicule. Il apparaît que plusieurs facteurs ont une influence sur la perception de la vitesse : la hauteur du point de vue, le champ de vision, le réalisme de l'environnement, mais aussi le réalisme des restitutions sonores et proprioceptives. Si certains simulateurs de conduite automobile sont suffisamment performants pour restituer le mouvement de façon satisfaisante selon tous ces critères, ce n'est pas forcément le cas de tous. Il en résulte alors une perception de la vitesse souvent sous-estimée, qui se traduit par une vitesse de conduite plus élevée que celle en conduite réelle. La validité perceptive du simulateur de conduite n'est alors plus suffisante pour certaines études de comportement du conducteur.

Pour tenter de résoudre ce problème, une technique a récemment vu le jour, consistant à modifier le champ de vision géométrique tout en gardant un champ de vision constant. C'est cette technique, quantifiée par un indice défini comme un facteur d'échelle visuelle, qui est étudiée de façon plus approfondie au cours de cette thèse. Nous avons notamment étudié comment ce facteur d'échelle visuelle influence la perception de la vitesse et avons déterminé la relation linéaire qui existe entre le changement de vitesse perçue et le facteur d'échelle visuelle utilisé. Nous avons ensuite déterminé dans quelle mesure il était possible de modifier dynamiquement ce facteur d'échelle visuelle afin de l'adapter au mieux en fonction des besoins de la simulation.

Les expérimentations présentées ici ont toutes été menées sur le simulateur de conduite dynamique SAAM, dont la conception, la réalisation et le réglage ont été effectués dans le cadre de cette thèse.

Mots clés : simulation de conduite, perception de vitesse, restitution visuelle, flux optique, champ de vision, champ de vision géométrique, restitution du mouvement.

VISUAL SCALE FACTOR FOR SPEED PERCEPTION RENDERING IN CAR DRIVING SIMULATION

ABSTRACT: Speed perception is an important task that the driver must perform continuously to control his/her vehicle. It appears that many factors influence this perception: height of the point of view, field of view, realism of the environment, but also realism of audio and proprioceptive rendering. If some high-performance car driving simulators are able to render motion satisfactorily according to all these criteria, it is not always the case. As a result, speed perception is thus often under estimated, leading into producing higher speeds than in real conditions. Perceptual validity is then not good enough to study driver's behavior.

To solve this problem, a technique has recently seen the light, which consists of modifying the geometric field of view while keeping the real field of view unchanged. This technique, quantified by a cue defined as the visual scale factor, is studied in-depth in this thesis. We particularly focused on the influence of this visual scale factor on speed perception and determined the existence of a linear relationship between the perceived speed variation and the actual visual scale factor. We have then determined in what extent it is possible to modify dynamically this factor in order to fit at best driving simulation needs.

The experiments presented here have all been carried out on the SAAM dynamic driving simulator which has been designed, realized and tuned in the framework of this thesis.

Keywords : driving simulation, speed perception, visual cueing, optic flow, field of view, geometric field of view, motion cueing.