



**HAL**  
open science

# Simulation d'un Affichage Tête Haute - Réalité Augmentée pour l'aide visuelle à la conduite automobile

Lynda Halit

## ► To cite this version:

Lynda Halit. Simulation d'un Affichage Tête Haute - Réalité Augmentée pour l'aide visuelle à la conduite automobile. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2016. Français. NNT: 2016ENAM0053 . tel-01598583

**HAL Id: tel-01598583**

**<https://pastel.hal.science/tel-01598583>**

Submitted on 29 Sep 2017

**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.

2016-ENAM-0053

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 – Traitement du Signal ”**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Lynda HALIT**

le 25 novembre 2016

**Simulation d'un Affichage Tête Haute - Réalité Augmentée  
pour l'aide visuelle à la conduite automobile**

Directeur de thèse : **Andras KEMENY**

Co-encadrement de la thèse : **Frédéric MERIENNE**

Tuteur industriel de la thèse : **Hakim MOHELLEBI**

**Jury**

M. Sylvain MICHELIN, Professeur, Université de la Rochelle

M. Daniel MESTRES, Directeur de recherche, CRVM, Université de la Méditerranée

M. Jean Christophe POPIEUL, Professeur, LAMIH, Université de Valenciennes

M. Pablo FIGUEROA, Directeur de recherche, Los Andes Universidad, Bogota, Colombie

M. Stéphane ESPIÉ, Directeur de recherche, IFSTTAR

M. Andras KEMENY, Professeur Associé, Arts et Métiers ParisTech, Renault

M. Frédéric MERIENNE, Professeur, Le2i, Arts et Métiers ParisTech

M. Hakim MOHELLEBI, Docteur, Renault

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

**T  
H  
È  
S  
E**



# Table des matières

<i>Résumé</i> .....	1
<i>Abstract</i> .....	3
<i>Avant-propos</i> .....	5
<i>Introduction Générale</i> .....	9
<i>Chapitre 1 – Les Interfaces Réalité Augmentée pour l’aide visuelle à la conduite automobile</i> .....	13
<b>1. Généralités sur la Réalité Augmentée - RA</b> .....	13
1.1. Définition de la Réalité Augmentée.....	13
1.2. Les caractéristiques de la Réalité Augmentée.....	13
1.3. Le continuum de la Réalité Virtuelle.....	14
1.4. Repères historiques.....	16
1.5. Les applications de la RA .....	22
1.5.1. Automobile .....	22
1.5.2. Les autres domaines.....	23
1.6. Interfaces RA et classifications fondamentales .....	24
1.7. Diffusion directe et indirecte d’information RA.....	27
1.8. Les différentes techniques d’affichage.....	28
<b>2. Affichage Tête Haute (ATH) pour l’aide avancé à la conduite automobile (ADAS) ....</b>	<b>31</b>
2.1. Définition.....	31
2.2. Aide Avancée à la conduite Automobile – ADAS .....	31
2.2.1. Les systèmes ADAS pour la stabilisation du véhicule .....	32
2.2.2. Les systèmes ADAS informatifs et préventifs.....	33
2.2.3. Les systèmes ADAS actifs agissant sur le contrôle longitudinal et/ou latéral .....	33
2.3. Utilité d’un ATH dans le véhicule.....	33
<b>3. Les Affichages Tête Haute - Réalité Augmentée</b> .....	<b>34</b>
3.1. ATH-RA pour la conduite automobile .....	34
3.2. Principe de fonctionnement.....	34
3.3. Avantages d’un ATH-RA.....	36
3.4. Les paramètres d’affichage .....	37
3.5. Applications en automobile et types d’informations.....	37
3.5.1. Informations liées au véhicule .....	38
3.5.2. Informations environnementales.....	38
3.5.3. Informations liées à l’itinéraire.....	38
3.5.4. Informations de supervision de conduite semi-autonome et autonome .....	39
3.5.5. Informations facultatives ou secondaires .....	39
<b>Conclusion</b> .....	<b>39</b>
<i>Chapitre 2 - Facteurs Humains et Ergonomie des Interfaces Conducteurs</i> .....	<b>41</b>
<b>1. La Perception Humaine</b> .....	<b>41</b>
1.1. La vision humaine.....	41
1.1.1. L’œil humain.....	41
1.1.2. La sensibilité spectrale des photorécepteurs .....	44

1.1.3. Caractéristiques fondamentales de la perception visuelle .....	44
1.1.4. L'intensité lumineuse et les types de vision.....	48
1.1.5. Fonctionnement des photorécepteurs avec la variation de l'intensité lumineuse.....	49
1.1.6. La perception de la profondeur .....	49
1.2. L'oreille humaine.....	53
1.2.1. L'oreille externe .....	54
1.2.2. L'oreille moyenne.....	54
1.2.3. L'oreille interne.....	54
<b>2. Comportement du conducteur et risque d'erreur.....</b>	<b>57</b>
2.1. Les agents de la conduite automobile.....	57
2.2. La tâche de conduite.....	59
2.3. Le comportement du conducteur.....	60
2.3.1. Le modèle hiérarchique du comportement conducteur .....	60
2.3.2. Caractérisation des tâches de l'utilisateur.....	61
2.3.3. Processus de prise de décision.....	62
<b>3. Analyse du risque routier et minimisation des erreurs.....</b>	<b>63</b>
<b>4. Principes ergonomiques des interfaces - conducteur .....</b>	<b>64</b>
4.1. Interface conducteur et charge mentale.....	64
4.2. La théorie des ressources multiples.....	65
4.3. Conception centrée sur l'utilisateur.....	66
4.4. Applications des méthodes ergonomiques pour la conception d'un ATH-RA .....	66
<b>Conclusion.....</b>	<b>67</b>
<b><i>Chapitre 3 - Problèmes Perceptifs d'un ATH-RA et Importance de la PMC.....</i></b>	<b><i>69</i></b>
<b>1. La Parallaxe Mouvement Conducteur - PMC .....</b>	<b>69</b>
1.1. Définition de la PMC.....	69
1.2. Modèle géométrique de l'erreur générée sur un écran .....	70
1.3. Problématique.....	71
1.4. La génération des mouvements de tête.....	71
1.5. Synthèse sur la génération des mouvements de tête par la conducteur .....	74
<b>2. Problèmes liés à la PMC .....</b>	<b>75</b>
2.1. Altérations visuelles identifiées.....	75
2.2. Autres problèmes identifiées et conséquences .....	76
<b>3. Facteurs expérimentaux et hypothèses de travail .....</b>	<b>78</b>
3.1. Les questions scientifiques.....	78
3.2. La PMC.....	78
3.3. La distance de projection .....	80
3.4. Les conditions de visibilité .....	82
3.5. Hypothèses principales .....	82
<b>Conclusion.....</b>	<b>83</b>
<b><i>Chapitre 4 – Méthodologie Expérimentale .....</i></b>	<b><i>85</i></b>
<b>1. Simulation de conduite et environnement virtuel.....</b>	<b>85</b>
1.1. Plateforme d'Intégration Interactrice P2I.....	85

1.2. Simulateur CCARDs.....	85
1.3. Logiciel de simulation SCANeR .....	86
1.4. ART- Tracking pour le suivi de tête.....	87
<b>2. Expérimentation avec des conducteurs volontaires .....</b>	<b>88</b>
2.1. Différence inter-individuelle.....	88
2.2. Différence intra-individuelle.....	89
2.3. Mal du simulateur.....	89
<b>3. Plan expérimental.....</b>	<b>89</b>
<b>4. Évaluation des résultats.....</b>	<b>90</b>
4.1. Les variables indépendantes.....	90
4.2. Les variables dépendantes.....	90
<b>5. Tests statistiques.....</b>	<b>91</b>
5.1. Utilisation des tests non-paramétriques.....	91
5.2. Test de Wilcoxon.....	91
5.3. Test de Friedman.....	91
5.4. Test de Nemenyi.....	92
5.5. Le test « r » de Bravais-Pearson.....	92
<b>Chapitre 5 - Étude de l'impact de la PMC avec un ATH-RA.....</b>	<b>95</b>
<b>1. Méthode .....</b>	<b>95</b>
1.1. Simulation d'un ATH-RA .....	95
1.2. Scénario de conduite .....	95
1.3. Procédure.....	96
1.4. Variable indépendante et variables dépendantes.....	96
1.5. Participants.....	98
<b>2. Résultats .....</b>	<b>99</b>
2.1. Les résultats subjectifs .....	99
2.1.1. Préférence .....	99
2.1.2. La précision de l'ATH-RA .....	99
2.2. Les résultats objectifs.....	102
2.2.1. Analyse du comportement des conducteurs.....	102
2.2.2. La Parallaxe de Mouvement Conducteur (PMC).....	102
2.2.3. Inter-distance véhicule (Time Headway).....	105
2.2.4. Interaction PMC et inter-distance véhicule.....	106
2.2.5. La variation de la vitesse.....	107
2.2.6. Variation de l'angle au volant.....	108
2.2.7. Accélération et freinage.....	109
<b>3. Discussion.....</b>	<b>110</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>112</b>
<b>Chapitre 6 – Études Expérimentales sur le Simulateur CCARDs.....</b>	<b>115</b>
<b>1. Impact de la PMC et de la distance de projection avec ATH-RA virtuel.....</b>	<b>115</b>
1.1. Objectif.....	115
1.2. Méthode.....	115

1.2.1. Simulation d'un ATH-RA.....	115
1.2.2. Scénario de conduite.....	116
1.2.3. Procédure.....	116
1.2.4. Variables indépendantes et variables dépendantes.....	117
1.2.5. Participants.....	118
1.3. Résultat.....	118
1.3.1. Capacité de mise au point.....	118
1.3.2. Distinction des marquages au sol.....	119
1.3.3. Précision de l'alignement de l'ATH-RA avec les informations réelles durant les lignes droites et les virages.....	120
1.3.4. Comparaison des conditions expérimentales et préférence.....	124
1.3.5. Adaptation comportementale.....	125
1.4. Discussion.....	125
<b>2. Impact de la PMC, la distance de projection et la condition de visibilité avec un ATH-RA virtuel.....</b>	<b>126</b>
2.1. Objectif.....	126
2.2. Méthode.....	127
2.2.1. Plan expérimental.....	127
2.2.2. Simulation d'un ATH-RA.....	128
2.2.3. Scénario de conduite.....	128
2.2.4. Procédure.....	129
2.2.5. Variables indépendantes et variables dépendantes.....	130
2.3. Résultat.....	132
2.3.1. Capacité de mise au point.....	132
2.3.2. La netteté de la RA.....	133
2.3.3. Facilité du changement de la direction du regard.....	134
2.3.4. Fréquence des images doubles.....	135
2.3.5. Facilité d'adaptation à la RA.....	136
2.3.6. Distinction des marquages au sol.....	136
2.3.7. Précision de l'alignement de l'ATH-RA.....	137
2.3.8. Pertinence de l'aide RA.....	139
2.3.9. Capacité de maîtrise de la trajectoire.....	139
2.4. Discussion.....	140
<b><i>Conclusion générale et perspectives.....</i></b>	<b><i>143</i></b>
<b><i>Bibliographie.....</i></b>	<b><i>151</i></b>
<b><i>Liste des Figures.....</i></b>	<b><i>167</i></b>
<b><i>Annexe 1 « Fiche de présentation expérimentale ».....</i></b>	<b><i>171</i></b>
<b><i>Annexe 2 « Questionnaire Expérimental 1 ».....</i></b>	<b><i>177</i></b>
<b><i>Annexe 3 « Questionnaire Expérimental 2 ».....</i></b>	<b><i>187</i></b>
<b><i>Annexe 4 « Nomenclature &amp; Abréviations ».....</i></b>	<b><i>189</i></b>
<b><i>Annexe 5 « Analyses Complémentaires ».....</i></b>	<b><i>193</i></b>







# Résumé

L’Affichage Tête Haute (ATH) est la solution émergente pour l’aide visuelle à la conduite automobile, surtout dans certaines conditions de visibilité réduite par un temps dégradé ou une route mal éclairée. Le dispositif ATH permet de projeter des informations virtuelles, directement dans le champ de vision central de la scène de conduite, sans détournement du regard de la route. La perception visuelle du conducteur est ainsi augmentée avec une coexistence entre le réel et le virtuel. Cependant, pour garantir la bonne perception de ces informations virtuelles et permettre aux conducteurs d’engager les actions appropriées au bon moment, il est nécessaire d’assurer un paramétrage optimal. Ce projet de thèse se consacre à l’étude de trois facteurs majeurs : (1) la Parallaxe de Mouvement du Conducteur – PMC, (2) la distance de projection de la RA, (3) la condition de visibilité. Ces différents facteurs ont été progressivement introduits au cours des expérimentations. Deux métaphores visuelles RA pour l’aide à la conduite primaire ont été spécialement conçues. Trois expérimentations ont été menées sur sujets réels dans les simulateurs de conduite de Renault. L’ATH-RA a été simulé virtuellement et intégré à l’environnement virtuel de conduite, ce qui a permis la réalisation d’études subjectives et objectives, afin d’étudier progressivement : l’impact de la PMC, le lien avec la distance de projection, et l’influence des conditions de visibilité. Dans ce travail pluridisciplinaire, nous tentons de comprendre comment les informations Réalité Augmentée sont perçues par le conducteur ainsi que l’influence sur le comportement et les performances durant la conduite, afin de proposer des préconisations sur les paramètres d’un ATH-RA.

**Mots- clés :** Affichage Tête Haute - Réalité Augmentée (ATH-RA), Parallaxe de Mouvement Conducteur (PMC), Simulation Virtuelle, Simulation de Conduite Automobile, Aide Visuelle à la Conduite Automobile.



# Abstract

Head-Up Display is the emerging solution for visual aid while driving a car, especially during reduced visibility conditions, such as bad weather or when the road is poorly lighted. The HUD device allows to project virtual information in the central field of view of the driving scene, enabling the driver to keep his attention on the road. The visual perception of the driver is therefore augmented, with a coexistence between the real and virtual world. However, it is necessary to ensure an optimal setting in order to guarantee the good perception of the virtual information, and allow drivers to take appropriate actions at the right moment. This thesis project is dedicated to study three important parameters: (1) The Driver Head Motion Parallax, (2) AR projection distance, (3) visibility conditions. An experimental approach has been implemented, with the selection of two AR visual metaphors for driving aid. Three experimentations with real subjects have been realized in Renault's driving simulators, where the three factors have been integrated progressively. The AR-HUD was simulated virtually and embedded in the virtual driving scene. This allowed to realize subjective and objective analysis to progressively study: the impact of the PMC, the link with the projection distance, and the influence of visibility conditions. The aim of this multidisciplinary work is an attempt to understand how AR information is perceived by the driver, and the influence on driver behavior and performance.

**Keywords:** Augmented Reality – Head-Up Display (AR-HUD), Driver Head Motion Parallax (HMP), Virtual Simulation, Car Driving Simulation, Visual Aid for Car Driving.



# Avant-propos

## Contexte et déroulement

Ce projet de travail de recherche expérimental est mené dans le cadre d'une thèse de doctorat avec une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE), ayant bénéficié d'un financement par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, et sous le contrôle de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT). La formation doctorale s'est déroulée à l'école doctorale de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers - ParisTech (ENSAM), dans la discipline « Sciences des Métiers de l'Ingénieur », avec une spécialisation en « Informatique – Signal et Image ». Ce travail est le fruit d'une collaboration entre l'employeur Renault- Service de la Réalité Virtuelle et de la Simulation Immersive au Technocentre, et l'institut Image d'Arts et Métiers ParisTech, rattaché au laboratoire Le2I – Laboratoire Electronique, Informatique et Image.

## Le centre de la Réalité Virtuelle et de la Simulation Immersive - Technocentre -Renault

C'est au cœur du service de la Réalité Virtuelle et de la Simulation Immersive au Technocentre de Renault, que se déroulent toutes les expérimentations menées dans le cadre de ces travaux de recherche. Ce centre héberge plusieurs simulateurs de conduite et des solutions de simulation immersive sophistiquées, qui sont à la disposition de tous les métiers Renault pour y effectuer des simulations et essais virtuels afin de valider les produits et les solutions en amont tels que:

- L'architecture, le design et la qualité perçue du véhicule
- La disposition et l'ergonomie des interfaces multimédia
- La visualisation des assemblages
- L'évaluation des ADAS dans un environnement virtuel
- Les tests des cas d'usages pour le véhicule autonome, et les cas spécifiques de reprise de contrôle par le conducteur



Figure ap.1 Simulateur Ultimate Renault    Figure ap.2 Salle Immersive 4K CAVE Renault

## L'institut Image du Laboratoire Le2I et le LiV

L'institut Image de l'École Nationale d'Arts et Métiers ParisTech se situe à Chalon-sur-Saône. C'est est une unité de recherche spécialisée dans l'immersion virtuelle. Les activités de recherche et de développement concernent les outils de prototypage numérique et se divisent sur deux axes principaux:

- L'interaction multi-sensorielle
- La visualisation mixte



Figure ap.3 Thématiques de l'Institut Image (Eddy BARILE, s. d.)

L'institut Image est affiliée au Laboratoire d'Electronique, Informatique et Image (Le2I – UMR CNRS 6306), qui est une unité mixte de recherche sous tutelle de l'Université de Bourgogne, du Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS et de l'École d'Arts et

Métiers ParisTech. À travers les différentes équipes, il couvre un large spectre d'activités en informatique, électronique et vision. L'un des points forts de l'institut concerne les différents partenariats académiques et industriels (Renault, EADS, AREVA Vallourec, EDF...).

La mise en place en 2011 d'un Laboratoire d'Immersion Virtuelle – LiV, commun entre Renault et l'École Supérieure des Arts et Métiers, a permis de mettre en place des projets collaboratifs pointus. Ces projets sont menés par des équipes de recherche mixtes des deux entités, et profitent ainsi de la double compétence académique et industrielle. L'objectif est de tester et mettre en place des outils de visualisation virtuelle immersifs et réalistes.



**GROUPE RENAULT**





# Introduction Générale

La conduite automobile est une activité sensori-motrice très complexe où les mécanismes sensoriels du conducteur sont sollicités en permanence pour guider la trajectoire du véhicule, éviter les obstacles et les dangers, et trouver des solutions alternatives en cas de problème. Malgré toutes les performances dont peut faire preuve un opérateur humain dans les situations les plus complexes, il lui arrive néanmoins de faire des erreurs qui peuvent avoir des conséquences fatales dans un environnement de conduite automobile. La modalité la plus sollicitée pour une tâche de conduite est la perception visuelle. Afin d'éviter les défaillances visuelles, il est important de s'assurer que les informations importantes sont bien perçues et rapidement interprétées par le conducteur. C'est pourquoi un système avancé d'aide visuelle à la conduite (Advanced Driver Assistance System - ADAS) peut être très utile pour rendre les informations pertinentes plus saillantes et plus faciles à interpréter. Cela permet au conducteur de les détecter rapidement pour qu'il puisse entreprendre les actions nécessaires au bon moment. Cependant, les questions que l'on peut se poser avant l'introduction d'un tel système ADAS sont les suivantes :

- Quelles technologies existantes peuvent être transférées et adaptées pour l'aide visuelle à la conduite automobile (ADAS visuel) ?
- Quelle est la procédure à utiliser pour présenter les informations au conducteur ?
- Quel est l'apport d'un système ADAS visuel pour l'aide à la conduite automobile ?
- Comment se déroulent la perception et l'interprétation de ces informations par les organes sensoriels ?
- Quel est l'impact de l'utilisation d'un ADAS visuel sur la perception du conducteur et sa performance de conduite ?
- Quels sont les facteurs humains durant la conduite et comment un système ADAS visuel peut modifier le comportement du conducteur ?
- Comment peut-on tester ce genre de système ? Et quels sont les réglages nécessaires ?

Ces questions vont être abordées progressivement dans la partie théorique de ce manuscrit en se basant sur l'état de l'art. Nous présenterons ensuite notre contribution expérimentale. Dans la partie expérimentale, nous nous sommes particulièrement intéressés aux interfaces virtuelles pour l'aide visuelle à la conduite automobile, et plus particulièrement à l'Affichage Tête Haute - Réalité Augmentée (ATH-RA). Un ATH-RA placé sous forme d'une lame transparente ou en utilisant directement la surface du pare-brise comme écran de projection, permet de visualiser un monde mixte réel-virtuel où la scène de conduite réelle domine les images de synthèse. Ceci a pour effet d'augmenter la perception de la réalité et de faciliter

la prise d'information. Les informations sont projetées sur l'ATH et le conducteur concentre davantage sa vision sur sa route, et l'œil fait moins d'effort pour accommoder. Cependant, la mise en place d'un tel système nécessite des études préliminaires et l'optimisation de divers paramètres techniques, afin de garantir un fonctionnement optimal et éviter certains problèmes perceptuels. En effet, il faut anticiper sur les cas où le système peut causer des gênes et apporter ainsi des solutions alternatives.

Dans le cadre de ces travaux de recherche, un ATH-RA est simulé virtuellement pour mener des tests dans un environnement de simulation de conduite réaliste au sein du Centre de Réalité Virtuelle et de la Simulation Immersive au Technocentre Renault. Deux métaphores visuelles RA pour l'aide à la conduite primaire ont été spécialement conçues : l'annotation des véhicules à proximité, et l'augmentation des lignes de marquage au sol.

Dans notre étude, nous nous sommes focalisés sur les questions suivantes :

- Quels sont les éventuels problèmes perceptuels lors de l'utilisation d'une interface-conducteur et comment peut-on résoudre certains de ces problèmes ?
- Comment optimiser les paramètres pour l'affichage des informations virtuelles ?

Les apports de la thèse sur le plan expérimental se résument à l'identification de paramètres majeurs pour la bonne perception des informations RA : (1) la Parallaxe de Mouvement du Conducteur – PMC, (2) la distance de projection de la RA, (3) la condition de visibilité. Ces facteurs ont été introduits progressivement au cours des trois expérimentations réalisées pour évaluer leur impact sur la perception de l'environnement mixte, le comportement du conducteur et la performance de conduite.

## Organisation du document

Le **premier chapitre** aborde d'abord un état de l'art général et pluridisciplinaire sur les interfaces Réalité Augmentée. Puis nous expliquons comment un ATH peut agir comme un système avancé d'aide à la conduite automobile et ses différents avantages. Enfin, les éléments théoriques et l'état de l'art concernant la spécificité des ATH-RA sont développés. Nous expliquons les motivations pour le choix d'une telle interface pour l'aide visuelle à la conduite automobile ainsi que le principe de fonctionnement.

Nous présentons dans le **deuxième chapitre** les bases de la perception humaine. Nous nous concentrons davantage sur la modalité visuelle, qui est la plus sollicitée lors de la conduite automobile. Nous exposons également dans ce chapitre quelques facteurs humains qui interviennent lors de la conduite automobile. Enfin, nous faisons le lien avec l'ergonomie des interfaces pour l'aide visuelle à la conduite.

Le **troisième chapitre** décrit les motivations qui nous ont poussés à mener ces travaux de recherche en décrivant le contexte scientifique. Les problèmes perceptifs des ATH-RA sont détaillés, et les facteurs expérimentaux sont enfin présentés avec les hypothèses de travail. Dans la deuxième partie de cette thèse, nous apportons notre contribution expérimentale, segmentée en trois chapitres. Dans le **quatrième chapitre**, nous présentons la méthodologie expérimentale ainsi que les moyens utilisés pour une simulation de conduite réaliste et un ATH-RA virtuel. Nous abordons ensuite dans le **chapitre cinq**, la première expérimentation réalisée pour étudier l'impact de la Parallaxe de Mouvement Conducteur. Enfin, nous concluons sur les résultats obtenus et les perspectives d'amélioration pour les prochaines expérimentations. Le **dernier chapitre** donne une description détaillée des deux autres expérimentations effectuées dans le cadre de cette recherche. La première partie concerne l'expérimentation permettant d'évaluer deux facteurs à deux niveaux. Il s'agit de l'étude de l'impact de la PMC et de la distance de projection. Dans la deuxième partie nous expliquons le lien avec les expérimentations précédentes et la nécessité d'ajouter un facteur expérimental supplémentaire sur la condition de visibilité de la route (en plus de la PMC et de la distance de projection).

En conclusion, nous examinons les résultats expérimentaux, et après une discussion générale nous envisageons des perspectives d'amélioration.



# Chapitre 1 – Les Interfaces Réalité Augmentée pour l'aide visuelle à la conduite automobile

Nous nous intéressons dans ce chapitre aux fondements de la Réalité Augmentée et nous allons voir comment elle se situe sur le continuum de la Réalité Virtuelle selon Paul Milgram. Nous allons expliquer comment utiliser cette technique pour présenter des informations d'aide à la conduite automobile (ADAS visuel). Puis nous nous intéressons particulièrement à l'ATH-RA et nous présentons ses différents avantages et les possibilités que peut offrir ce système dans le cadre de la conduite automobile.

## 1. Généralités sur la Réalité Augmentée - RA

### 1.1. Définition de la Réalité Augmentée

La Réalité Augmentée est une terminologie utilisée pour désigner une application qui utilise des éléments de synthèse pour enrichir l'environnement réel et augmenter l'un des sens de l'utilisateur. Ce concept permet de rajouter des informations pertinentes en temps réel dans un contexte donné, afin d'avoir une meilleure perception de l'environnement réel. La technique s'applique à l'augmentation des différents sens : la vue, l'ouïe, l'odorat, le toucher, et même le goût ! Des combinaisons d'augmentations sont également possibles pour enrichir l'environnement d'un point de vue sensoriel et de permettre à l'utilisateur une meilleure immersion et proprioception. Cette technique est appelée « Réalité Augmentée Multi-Sensorielles », et sa complexité s'accroît avec l'augmentation de différents sens. Cependant, avant d'utiliser ce type de technique, des études au préalable sont nécessaires pour garantir : la précision de ces informations sensorielles, la synchronisation temporelle et l'alignement spatial. Nous nous focalisons dans notre étude sur l'augmentation de la perception visuelle en enrichissant le monde réel avec des informations virtuelles spécialement conçues dans le cadre de ce travail.

### 1.2. Les caractéristiques de la Réalité Augmentée

Ronald Azuma, l'un des pionniers de la Réalité Augmentée, a énoncé en 1997 lorsqu'il était chercheur à l'université de Caroline du Nord, les trois caractéristiques définissant ce système :

- La combinaison du réel et du virtuel
- Une interaction en temps réel
- Un recalage en 3D entre le réel et le virtuel

Le même auteur présente dans son papier quelques exemples d'application où des objets 3D sont intégrés à l'environnement réel. Il expose les plus grands défis pour corriger les erreurs et les problèmes les plus courants. L'intérêt de la RA réside dans sa capacité à augmenter la perception et l'interaction avec le monde réel, ce qui permet d'afficher des informations qui ne sont pas directement visibles naturellement par l'utilisateur ou difficilement détectables avec ses propres sens (R. T. Azuma & others, 1997). Dans le schéma ci-dessous (Figure 1.1), un aperçu du fonctionnement général d'une application RA.

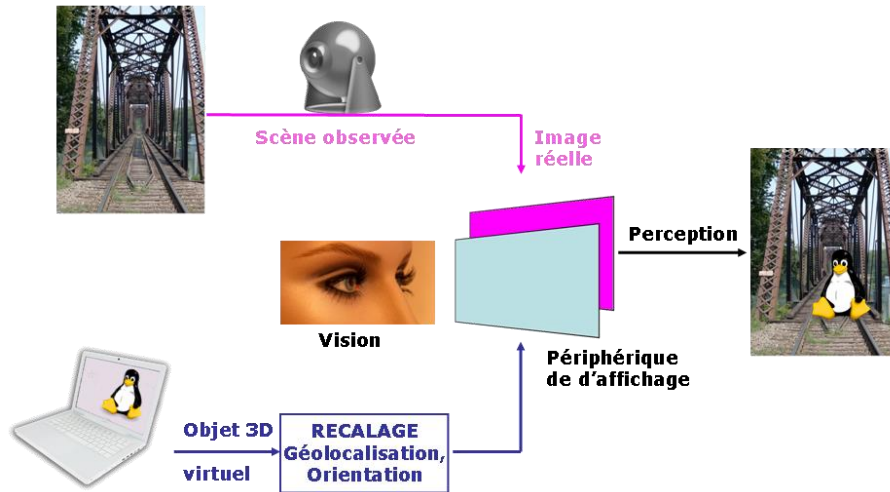


Figure 1.1 Fonctionnement d'une application RA (Schimpf, 2010)

### 1.3. Le continuum de la Réalité Virtuelle

Paul Milgram et Fumio Kishino abordent pour la première fois le continuum de la Réalité Virtuelle en 1994 dans le papier intitulé « A taxonomy of mixed reality visual displays » (Milgram & Kishino, 1994). Le schéma en Figure 1.2, décrit une taxonomie qui explique le lien entre la Réalité Virtuelle et la Réalité Augmentée. Les deux extrémités représentent « l'environnement réel » d'un côté, et « l'environnement virtuel » d'un autre côté. La région entre les deux milieux est appelée « Réalité Mixte », elle intègre dans son spectre la « Réalité Augmentée » et la « Virtualité Augmentée ».

Comme nous pouvons sur la Figure 1.2, la RA se rapproche plus du monde réel, car la réalité est la perception dominante, malgré une augmentation synthétique visuelle. Les informations virtuelles sont utilisées pour renforcer la perception réelle et enrichir l'environnement. Tandis que la « Réalité Virtuelle » consiste à créer un environnement virtuel réaliste, où l'utilisateur est totalement immergé dans un monde entièrement synthétisé qui peut reproduire, ou pas, les propriétés du monde réel.

# Réalité Mixte



Figure 1.2 Le continuum de la Réalité Virtuelle (Milgram & Kishino, 1994)

## La Réalité Mixte

Le continuum de la Réalité Virtuelle, établi et amélioré au fil des années par Milgram et ses collaborateurs permet de faciliter la compréhension des différentes composantes de la Réalité Mixte. Le principe de base expliqué dans (Milgram, 2006), est que la Réalité Mixte est un spectre continu qui va de l'extrémité d'un environnement réel à l'extrémité de l'environnement virtuel (ou inversement). Ceci permet de mieux voir les possibilités de combinaison de ces deux mondes et de mieux situer les différentes applications. En partant de cette base, il définit l'image RA comme toute représentation qui implique une augmentation ou un renforcement du réel avec des informations virtuelles générées par ordinateur.

## La Réalité Augmentée

La Réalité Augmentée est présentée comme un sous ensemble de la réalité mixte, définie dans le contexte plus large du continuum de la Réalité Virtuelle. Dans un système RA, l'image principale repose sur le réel, et les objets virtuels ont comme objectif d'améliorer la perception du réel (Milgram & Drascic, 1997). L'article souligne aussi que la réalité augmentée permet d'améliorer la perception du monde réel en facilitant la transition entre le réel et le virtuel. Cette technique peut d'ailleurs être utilisée pour afficher des informations que l'homme serait incapable de détecter avec ses propres capacités sensorielles naturelles.

## La Virtualité Augmentée

Dans la taxonomie précédente, on peut constater que la virtualité augmentée se rapproche davantage d'un milieu virtuel. C'est donc un environnement mixte, avec une dominance virtuelle et quelques éléments réels pour augmenter le virtuel (Milgram & Kishino, 1994).



## **La Réalité Virtuelle**

Le monde virtuel peut être créé en s'inspirant de l'existant (le réel), ou bien en imaginant un nouvel environnement. La RV permet une immersion totale de l'utilisateur dans un monde purement synthétique (généré par ordinateur). L'intérêt de la RA est présenté par (Fuchs, Moreau, & Burkhardt, 2006), en cinq classes différentes, regroupant des applications avec des objectifs communs, peu importe le domaine : la compréhension, la conception, l'apprentissage, le contrôle, et la distraction.

## **La relation de la Réalité Augmentée avec le réel et le virtuel**

Selon Ronald Azuma, la Réalité Augmentée est une variante de la Réalité Virtuelle, car elle permet de voir le monde réel avec des objets virtuels superposés avec l'environnement réel. Il utilise le mot de coexistence entre l'espace virtuel et l'espace réel, car la RA complète l'espace réel, mais ne le remplace en aucun cas. Le rôle de la RA est de faciliter la compréhension de certains éléments dans un contexte donné. Comme l'a précisé Brooks en 1996, la RA permet l'extension des capacités humaines. Les informations virtuelles véhiculées permettent à l'utilisateur de : simplifier ses tâches dans le monde réel, repérer plus aisément les objets environnants, améliorer sa perception et son interaction avec le monde réel (R. Azuma et al., 2001). D'un point de vue sensoriel, plusieurs confusions peuvent se présenter dans un environnement purement virtuel, alors que dans le cas d'une RM, le maintien du monde réel sert de base du processus perceptif. Il permet, par exemple, d'avoir plus de cohérence entre la perception visuelle et le système vestibulaire de l'oreille interne (Burkhardt, Bardy, & Lourdeaux, 2003), et l'utilisateur peut s'appuyer sur les mêmes indices utilisés au quotidien (Anastassova, 2006).

## **La Réalité Diminuée**

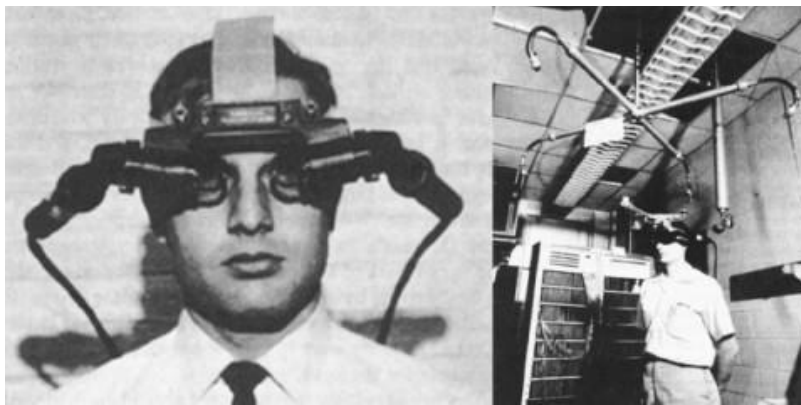
En superposant des objets virtuels sur l'environnement réel, il est également possible de cacher des objets réels, ou une partie de l'environnement, dans ce cas, on parle de « Réalité Diminuée ». L'un des objectifs de la RD est de mettre en valeur certains éléments, qui sont plus utiles pour l'utilisateur dans un contexte donné. On peut par exemple permettre à un technicien de maintenance de voir des parties cachées (avec la RA), et le guider progressivement dans sa tâche, en segmentant le processus en plusieurs étapes.

### **1.4. Repères historiques**

Les éléments historiques présentés dans cette partie s'intéressent principalement à la Réalité Augmentée visuellement. En effet, comme indiqué précédemment, ce concept de RA peut s'élargir aux différents sens (1.1).

Le concept d'augmentation des sens humains remonte à il y a environ 60 ans, avant même l'apparition de la terminologie « Réalité Augmentée » associée à cette technique. C'est Morton Heiling, un producteur de film, qui fut le premier en 1962, à mettre au point une machine appelée « Sensorama » afin d'améliorer l'immersion cinématographique (Heilig Morton L, 1962). C'est une cabine individuelle permettant la diffusion des courts-métrages en vision stéréoscopique, avec comme option l'augmentation de plusieurs sens perceptifs, qui sont adaptés au fur et à mesure aux scènes visuelles présentées à l'utilisateur : vibration du siège, utilisation d'un ventilateur (pour simuler l'air frais par exemple) et diffusion d'odeurs. L'un des scénarios imaginé avec cette technique, est une balade en moto dans les rues de New York. Ce qui a été mis en place avec une simulation virtuelle de la rue de Brooklyn, en interagissant avec l'utilisateur au moyen de l'augmentation de certains sens perceptifs cités précédemment.

En 1968, un premier casque HMD « Head Mounted Display » a été créé par Ivan Sutherland (chercheur au laboratoire du MIT), appelé « l'épée de Damoclès » (cf. Figure 1.3). Il permet la visualisation du monde réel en y incrustant des images de synthèses, grâce à des tubes cathodiques miniaturisés et un suivi de tête à l'aide d'un bras mécanique. Malgré tout le caractère innovant de ce casque, il présentait à l'époque plusieurs contraintes techniques et mécaniques, notamment un faible espace de mouvement (limité par le bras mécanique), et un poids très imposant (Sutherland, 1968).



*Figure 1.3 HMD optique (Sutherland, 1968)*

Dans le domaine de l'aviation, McDonnell Douglas présente en 1997 un casque RA (cf. Figure 1.4), spécialement conçu pour les pilotes de chasse, qui permet l'affichage d'informations virtuelles sur la visière du casque dans le champ de vision du pilote directement superposé au monde réel (« Multimedia: History, Theory and Practice », s. d.).

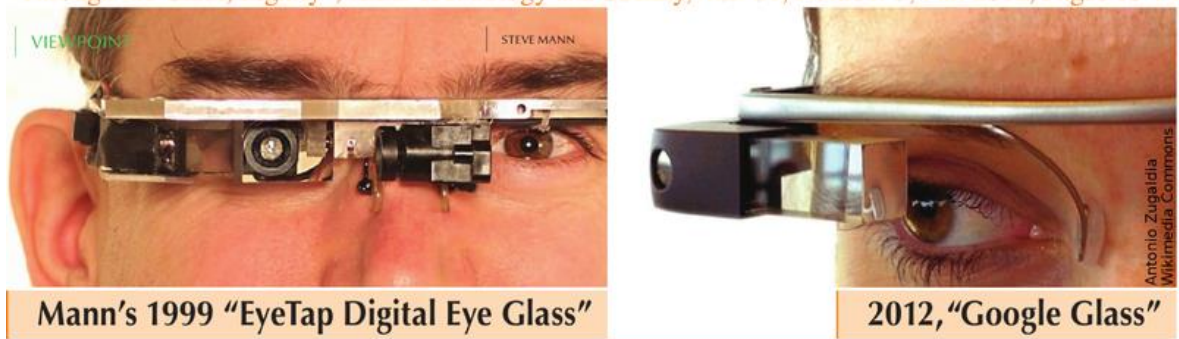


Figure 1.4 HMD RA pour les pilotes

Steve Mann, en 1980, a quant à lui proposé un dispositif complètement opérationnel de RA, dénommé « The EyeTap ». La suite de ces travaux de recherche ont permis de mettre en place des dispositifs beaucoup plus légers et moins encombrants (Mann, 2002).



“Through the Glass, Lightly”, IEEE Technology and Society, Vol. 31, Number 3, Fall 2012, Pages 10-14



Mann was recognized as “Father of AR” and the “Father of Wearable Computing” (IEEE ISSCC 2000)

Figure 1.5 Photomontage montrant les différentes caméras portées par Steve Mann de 1980 à 1999 (Glogger, 2016)

C'est qu'en 1992, que le terme « Réalité Augmentée » fut utilisé pour la première fois par Tom Caudell et David Mizell, deux ingénieurs au sein du groupe Boeing, dans un papier scientifique intitulé en anglais «Augmented Reality : an application of Heads-Up Display

technology to manual manufacturing processes ». Ils décrivent dans cet article les étapes pour l'implémentation d'un système « see-through Head-Up Display » : un Affichage Tête Haute (ATH) optique (Caudell & Mizell, 1992).

Dans la même année, un projet d'aide à la maintenance dénommé KARMA : Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance, a été mené par Michael Bajura et son équipe (Jean-Michel, 2013). C'est un système d'aide et d'apprentissage, qui permet de guider le technicien avec des informations pertinentes pour l'entretien et la réparation d'une imprimante laser (cf. Figure 1.6).



Figure 1.6 KARMA (Feiner, Macintyre, & Seligmann, 1993)

En 1994, Pierre Wallner publie sa thèse sur l'interaction avec des documents papiers sur un bureau virtuel « The Digital Desk » (cf. Figure 1.7). Une augmentation des documents papiers est effectuée à travers des projections virtuelles par ordinateur (Wellner, 1991).

La même année, Paul Milgram et Fumio Kishino abordent pour la première fois la taxonomie de la Réalité Virtuelle « Continuum of Virtuality » (cf.1.3).



Figure 1.7 « The Digital Desk » (Wellner, 1991)

L'apparition des marqueurs 2D en 1996 a également propulsé la croissance des applications RA dans différents domaines. C'est à Jun Rekimoto à qui on doit en premier cette innovation (Rekimoto, 1998).

L'un des concepts les plus influents dans le développement de la RA en environnement mobile, est celui de Steve Feiner et de son équipe en 1997. Ces chercheurs publient un article où ils présentent un prototype appelé « The Touring Machine » pour la recherche

d'informations et la navigation extérieure (MARS : Mobile Augmented Reality System). Le système est un casque qui intègre plusieurs technologies complémentaires : un système d'affichage, le contrôle de position par satellites GPS et un accès internet par ondes radio, afin d'afficher des informations virtuelles directement dans l'espace 3D réel (cf. Figure 1.8). Ce système est utilisable à l'extérieur (R. Azuma et al., 2001; Feiner, MacIntyre, Höllerer, & Webster, 1997).



Figure 1.8 « The Touring Machine » (Feiner et al., 1997)

La mise en place du premier logiciel libre « ARToolkit » par Hirokazu Kato et Mark Billinghurst en 1999 a permis de toucher une plus grande communauté de scientifiques. En effet, cette librairie open-source, disponible en multiplateformes, est spécialement dédiée à la création d'interfaces RA. Elle a ainsi permis la vulgarisation des outils RA et a contribué à leur enrichissement. Puis en 2006, un modèle de tracking hybride a été révélé par Gerhard Reitmayr et Tom Drummond pour l'utilisation de la RA en extérieur. Un système de tracking multi-supports a suivi en 2009, (Reitmayr & Drummond, 2006). Hamidia et son équipe (Hamidia, Zenati-Henda, Belghit, & Belhocine, 2014) ont réalisé un état de l'art regroupant quelques exemples de techniques reposant sur les marqueurs Cybercode (Rekimoto, 1998), ARToolKit (H. Kato & Billinghurst, 1999), et d'autres techniques sans marqueurs. Ces techniques sans marqueurs reposent sur les caractéristiques géométriques (Yang Yang & Cao, 2013), les techniques de luminances ou encore les points d'intérêts (Herling & Broll, 2011). Myron Krueger, un pionnier de ce qu'il appelle « La Réalité Artificielle », a créé le projet « the Videoplace », qui est une chambre qui permet aux utilisateurs d'interagir avec les objets virtuels. Le principe est simple : un écran est utilisé pour effectuer une projection virtuelle de l'utilisateur lui-même et d'autres objets virtuels avec lesquels il peut interagir en temps-réel. Les éléments virtuels peuvent être générés par ordinateur et peuvent représenter d'autres utilisateurs (Krueger, 1977).

Dans le repère historique ci-après, une présentation de l'évolution des principales innovations autour de la réalité augmentée est illustrée (Manon Boschard & Lucas Zapata (EditoCEN, s. d.).

# LA RÉALITÉ AUGMENTÉE : DATES CLEFS



IVAN SUTHERLAND CRÉÉ  
LE PREMIER SYSTÈME DE  
RÉALITÉ AUGMENTÉE

1968

UTILISATION  
MILITAIRE

1980

TOM ET DAVID CAUDELL  
MIZELL INVENTENT LE  
TERME  
« RÉALITÉ AUGMENTÉE »

1992

JUN REKIMOTO ET  
KATASHI NAGAO  
DÉVELOPPENT LE  
NAVICAM

1995

PREMIÈRES  
GRANDES EXPÉRI-  
MENTATIONS  
APPLICATIVE :  
PROJET  
ARCHEOGUIDE

2001



HIROKAZU KATO ET MARK  
BILLINGHURST PRÉSENTE  
ARTOOLKIT, QUI PROPOSE UNE  
LIBRAIRIE DE REPÈRES POUR  
LE TRACKING (OPEN SOURCE)

1999

AUTRE EXPÉRIENCE « MAP IN  
THE HAT » AVEC GPS,  
BOUSSOLE, AFFICHAGE TÊTE  
HAUTE ET PC  
DANS LE SAC À DOS.

1998



L'UNIVERSITÉ DE COLUMBIA  
DÉVELOPPE LA  
« TOURING MACHINE »,  
LE PREMIER SYSTÈME MOBILE  
DE RÉALITÉ AUGMENTÉE.

1997

1996

JUN REKIMOTO  
PRÉSENTE DES  
MARQUEURS 2D POUR  
PERMETTRE LE  
TRACKING CAMERA  
AVEC SIX DEGRÉS DE  
LIBERTÉ.

PREMIERS JEUX : HUMAN  
PACMAN ET PREMIER JEU DE  
CHASSE AUX MOUTSIQUES  
"MOZZIES" SUR TÉLÉPHONE  
MOBILE SIEMENS

2003

APPLICATION DE RÉALITÉ  
AUGMENTÉ :  
POMPEI –  
PROJET LIFEPLUS

2004



2006

PREMIÈRE  
EXPIÉRIENCE DE  
RÉALITÉ AUGMENTÉE  
« OPTICAL SEE  
THROUGH » :  
PROJET REVES CITÉ  
DES SCIENCES

2009

SPRIMOBILE  
ANCE LAYAR

PREMIÈRE PUBLICITÉ  
SUR MOBILE EN RÉALITÉ  
AUGMENTÉE  
(WELLINGTON ZOO)

PMETAIO  
PRÉSENTE  
LE MOBILE AR  
MUSEUM GUIDE

MOBILIZY LANCE  
WIKITUDE

PREMIÈRE  
ATTRACTION GRAND  
PUBLIC: LES ANIMAUX  
DU FUTUR  
(FUTUROSCOPE)

2008

PREMIÈRES TECHNOLOGIES  
PLUS ROBUSTE D'ANALYSE  
D'IMAGE SANS TRACKER  
(UNIVERSITÉ D'OXFORD)

2007

PREMIER MODÈLE DE  
TRACKING HYBRIDE POUR  
DE AUGMENTÉE EXTÉ-  
RIEURE (UNIVERSITÉ DE  
CAMBRIDGE)

PROTOTYPE MARA DE  
NOKIA (GPS, BOUSSOLE,  
ACCÉLÉROMÈTRE)

LUNETTES DE RÉALITÉ  
AUGMENTÉ : LASTER,  
GOOGLE GLASSES...

AUJOURD'HUI

LUNETTES, LENTILLES,  
TECHNOLOGIES DE TRACKING,  
APPLICATIONS AVANCÉES..

FUTUR



## **1.5. Les applications de la RA**

La Réalité Augmentée émerge de plus en plus dans le secteur industriel et le marché grand public, et s'impose progressivement dans un monde moderne à l'ère de la robotique. La Réalité Augmentée est l'un des outils qui influence le plus les innovations numériques dans différents secteurs d'activité. Ainsi, plusieurs utilisateurs potentiels sont déjà identifiés : les techniciens pour accomplir leurs tâches, les designers pour visualiser leurs prototypes, les médecins pour afficher des parties difficiles d'accès, ou bien les étudiants pour faciliter leur apprentissage. La Réalité Augmentée permet d'accompagner ces utilisateurs en enrichissant leur environnement de données virtuelles couplées au monde réel. Chacun de nous est un utilisateur potentiel, car les applications sont nombreuses pour les besoins relatifs aux tâches quotidiennes ou ceux de la vie professionnelle. Les domaines d'utilisation de la réalité augmentée sont donc très larges. Le livre «Augmented Reality Emerging Applications » (Woodward & Hakkarainen, 2011) présente plusieurs applications émergentes en réalité augmentée. On retrouve des exemples d'applications dans les domaines suivants : automobile, aviation, design, téléassistance, maintenance, médical et chirurgie, architecture, archéologie, tourisme, marketing et publicité, ameublement, jeux vidéo, cinéma, éducation, arts, décoration, restauration, textile et habillement...

Dans certains de ces domaines, la Réalité Augmentée connaît des avancées remarquables, car elle offre de nombreux avantages. Dans la partie qui va suivre, nous citons de manière non exhaustive quelques applications dans différents secteurs d'activité.

### **1.5.1. Automobile**

Dans le domaine industriel automobile, la RA peut être utilisée dans toutes les étapes de la chaîne de fabrication et de production du véhicule par les designers, les ergonomes, les mécaniciens, les électroniciens, les techniciens... Le prototype virtuel du véhicule peut être visualisé et modifié plusieurs fois à moindre coût. Anastassova et ses collaborateurs, ont travaillé par exemple, sur la formation de techniciens en automobile et sur l'utilisation du concept de la Réalité Augmentée pour l'aide à l'apprentissage des techniques de maintenance (Anastassova & Burkhardt, 2009; Barma, Power, & Daniel, 2010). Le véhicule peut être équipé d'une interface RA dédiée à l'assistance du conducteur dans ses tâches : manœuvres, contrôle longitudinal et latéral, itinéraire, évitement d'obstacles...Plusieurs métaphores visuelles ont été proposées dans la littérature pour présenter des indications en RA au conducteur (George, Thouvenin, Fremont, & Cherfaoui, 2012), surtout avec la démocratisation des Affichages Tête Haute (ATH).

## 1.5.2. Les autres domaines

- **Industrie Vidéo-Ludique**

Le domaine des jeux vidéo est l'un des secteurs porteurs en matière d'innovation technologique et de créativité numérique. Plusieurs facteurs y contribuent, notamment : la collaboration de plusieurs équipes issues de différentes disciplines pour mettre au point un jeu vidéo-ludique, l'incitation à l'utilisation de nouvelles technologies pour améliorer l'interaction entre les joueurs et l'environnement virtuel ; et l'intégration du joueur dans le processus de la créativité. Les milieux virtuels sont utilisés depuis longtemps dans le domaine des jeux vidéo et la synthèse d'image a évolué au fil des années pour atteindre un niveau d'immersion et de réalisme fascinant. Grâce aux progrès réalisés sur les techniques de synthèses d'images et la résolution de plusieurs contraintes techniques (comme le phénomène de latence, le suivi et le recalage d'images), de nombreuses applications de jeux sont mises en place (Broll, Ohlenburg, Lindt, Herbst, & Braun, 2006; Leino, Wirman, & Fernandez, 2008).

- **Assistance Technique et Maintenance Industrielle**

Dans le cadre d'une application industrielle pour la maintenance ou l'assistance, la RA peut non seulement permettre de gagner du temps, mais elle peut aussi jouer un rôle important pour augmenter la sécurité des usagers. Nous citons à titre d'exemple le projet KARMA, qui est un projet d'aide à la maintenance sur des imprimantes laser (Bottecchia, 2010). Un autre exemple d'application est celui du système d'assistance à l'interaction 3D pour le travail et le télétravail collaboratifs dans les environnements de Réalité (Ouramdane, 2008). Quelques autres applications industrielles sont présentées dans le document de Rúben Oliveira et al. : « Augmented Reality and the Future of Maintenance » (Oliveira, Farinha, Raposo, & Pires, 2014), ou il traitent entre autres l'utilisation de la RA pour améliorer la formation des techniciens et les interventions de maintenance. Michel Dancette, directeur de l'innovation chez Fives (Groupe d'ingénierie industrielle international), indique durant un séminaire des ressources technologiques et innovation, que ce qui va constituer l'usine du futur existe déjà. Il évoque notamment le principe de la « cobotique » (néologisme utilisé pour indiquer la robotique collaborative) et de la réalité augmentée qui viendrait aider et compléter cette coopération entre les machines et les humains, le but étant de faciliter les tâches les plus rudes et d'assister les opérateurs à tous les étapes du processus industriel (Dancette, 2015).

- **Éducation et Apprentissage**

Dans le domaine de l'éducation, la RA permet de présenter des informations d'une manière ludique et instructive, et d'illustrer virtuellement ce qui est difficilement représentable ou



accessible dans le monde réel. Charlotte Orliac présente dans sa thèse les atouts et les limites des jeux pédagogiques (serious & learning games) et les apports de la RM (Orliac, 2013).

- **Domaine Médical**

Dans le domaine médical, le succès de cette technique a déjà montré ses preuves dans la chirurgie, et aussi dans le traitement des troubles cognitifs et comportementaux afin de vaincre les peurs ou les phobies (Dubois, 2001; Nicolau, Garcia, Pennec, Soler, & Ayache, 2005; Tonetti, 2003).

- **Tourisme**

Le secteur touristique exploite cette technologie pour assurer des visites guidées augmentées (Ghouaiel, Cieutat, & Jessel, 2011) ou être accompagné par un guide touristique virtuel, comme dans les travaux de Morgan Veyret, dans le cadre du projet ANR SIRENE pour la visite guidée du musée d'Océanopolis de Brest.

- **Mode, habillement et textile**

Dans le domaine du textile et de la mode, davantage de nouvelles technologies sont utilisées pour acquérir de nouveaux marchés et attirer ainsi des clients dans leurs boutiques. Nous pouvons citer l'exemple du miroir augmenté « Memory Mirror » de la société Memoni, installé dans l'une des boutiques de l'enseigne Neiman Marcus. Ce miroir intelligent permet d'essayer des vêtements et des chaussures virtuellement et de donner un aperçu visuel au consommateur en temps réel, avec la possibilité de changer de modèle et de couleur à tout moment. Il propose des fonctionnalités intéressantes en mémorisant le profil des clients (CBS News, 2015). D'autres modèles vont encore plus loin, en proposant un miroir Réalité Augmentée avec une reconnaissance de formes du visage. Ceci rend possible le test de produits cosmétiques, de maquillage ou encore de coiffure (Julien Bergounhox, 2014).

## **1.6. Interfaces RA et classifications fondamentales**

La croissance des interfaces Réalité Augmentée sur le marché et l'évolution des technologies incitent les chercheurs à reconsidérer les classifications existantes, à les compléter et à en proposer d'autres. Ainsi, plusieurs taxonomies ont été retrouvées dans la revue de littérature avec des critères d'évaluation bien différents. Les auteurs dans (Normand, Servieres, & Moreau, 2012), ont proposé un état de l'art sur les taxonomies existantes en les divisant en 4 catégories globales : (1) les taxonomies centrées sur la technique, (2) les taxonomies orientées utilisateur, (3) les taxonomies centrées sur les informations, et (4) les taxonomies centrées sur la cible augmentée. Nous présentons ci-après ces classifications selon l'approche de ces auteurs.

- **Les taxonomies centrées sur la technique**

Les classifications qui reposent sur les techniques de visualisation sont regroupées dans cette partie. On retrouve par exemple la taxonomie sur la Réalité Mixte (Milgram & Kishino, 1994), où trois critères sont définis :

- Le degré de connaissance de l’environnement (Extend of World of Knowledge - EWK). Ce critère évalue la quantité d’informations connues sur l’environnement.
- La fidélité de reproduction (Reproduction Fidelity - RF). Ce critère représente la qualité des éléments virtuels et le réalisme de la représentation.
- La sensation de présence (Extend Presence Methaphor - EPM). Le degré d’immersion de l’utilisateur est analysé pour déterminer la sensation de présence.

Une autre classification plus globale des interfaces mixtes a été présentée par (Milgram & Colquhoun, 1999). Elle repose sur 3 axes principaux :

- Axe 1 : Le continuum de la Réalité-Virtualité (cf. Chapitre 11.3Chapitre 1 .1.3 )
- Axe 2 : La centralité du type de dispositif (egocentrique- exocentrique)
- Axe 3 : La congruence des informations affichées

- **Les taxonomies orientées utilisateur**

Plusieurs exemples de taxonomies orientées utilisateurs existent dans la littérature, comme le rapportent les auteurs dans Normand et al. (Normand et al., 2012). Dans « A Classification Scheme for Muti-Sensory Augmented Reality » (Lindeman & Haruo Noma, 2007), la méthodologie utilisée s’appuie sur le lieu où la fusion entre le réel et le virtuel se produit par rapport à l’utilisateur.

## La taxonomie fonctionnelle de la Réalité Augmentée

Fuchs et Moreau présentent dans « Le Traité de la RV » (Fuchs et al., 2006), une approche fonctionnelle de l’association d’images réelles avec des entités virtuelles, en se basant sur l’importance de la relation entre le réel et le virtuel sans se soucier des techniques d’affichage envisagées. C’est ce que nous résumons dans la Figure 1.9 ci-dessous.

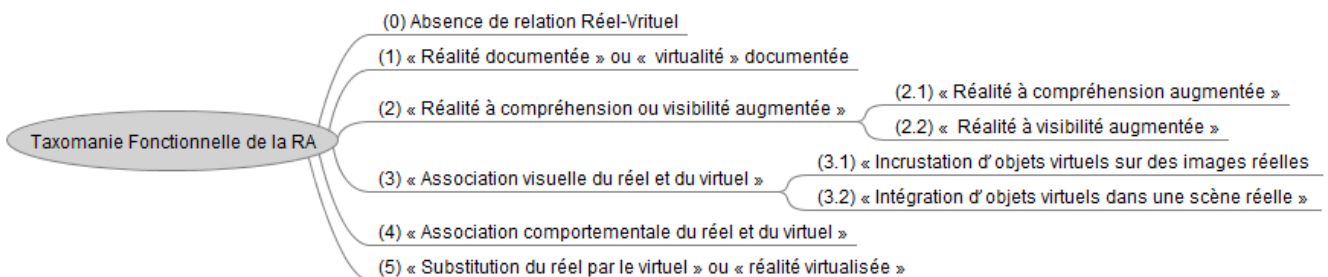


Figure 1.9 Taxonomie Fonctionnelle de la RA

- Fonctionnalité 1 « Réalité Documentée » ou « Virtualité Documentée » :  
La modalité « réelle » ou « virtuelle » est accompagnée d'une documentation (ajout d'un texte sur une image par exemple)
- Fonctionnalité 2 « Réalité à Compréhension ou Visibilité Augmentée » :  
Le même écran d'affichage est utilisé. On peut distinguer deux sous-niveaux :
  - Fonctionnalité 2.1 « Réalité à Compréhension Augmentée » :  
Incrustation d'informations sémantiques passives pour l'augmentation de la compréhension de la scène réelle
  - Fonctionnalité 2.2 « Réalité à Visibilité Augmentée » :  
Correspondance géométrique précise avec les contours des objets réels.
- Fonctionnalité 3 « Association Visuelle du Réel et du Virtuel » :
  - Fonctionnalité 3.1 « Incrustation d'objets virtuels sur des images réelles » :  
Aucune occultation mais une association par superposition
  - Fonctionnalité 3.2 « Intégration d'objets virtuels dans une scène réelle » :  
Association tridimensionnelle
- Fonctionnalité 4 « Association comportementale du réel et du virtuel » :  
Prise en compte des propriétés physiques suivant les lois de la gravité, de contact, d'élasticité, de fluidité...
- Fonctionnalité 5 « Substitution du Réel par le Virtuel » ou « Réalité Virtualisé »

Nous pouvons relever deux fonctionnalités de la taxonomie présentée ci-dessus, qui peuvent être très utiles dans le cadre d'une application pour l'aide à la conduite automobile : la fonctionnalité 2 « Réalité à Compréhension ou Visibilité Augmentée » et la fonctionnalité 3. Il s'agit d'afficher des informations virtuelles pour améliorer la perception de l'environnement de conduite, ou bien dans le but d'aider le conducteur à relever les informations pertinentes et analyser rapidement la situation et entreprendre les actions nécessaires. La seconde fonctionnalité (F2) est l'association visuelle du réel et du virtuel, en complétant l'environnement avec l'association d'une métaphore à un objet réel en 2D ou 3D.

- **Les taxonomies centrées sur l'information**

Cette taxonomie stipule que la manière dont sont présentées les informations, est prise en compte pour catégoriser ces interfaces RA. Les taxonomies centrées sur l'information tel que cela a été défini par (Normand et al., 2012), se focalise sur deux facteurs principaux qui définissent la visualisation des informations virtuelles :

- L'environnement de visualisation de 0D à 3D
- Le point de vue de l'utilisateur

- **Les taxonomies centrées sur la cible augmentée**

Comme l'ont rapporté les auteurs du papier « A typology of augmented reality applications based on their tracking requirements » (Normand et al., 2012), la taxonomie de Wendy Macky repose sur une classification des critères de la cible à augmenter, avec trois possibilités : l'augmentation de l'utilisateur, l'augmentation d'un objet réel ou l'augmentation l'environnement (Mackay, 1996).

Nous allons présenter dans la partie qui va suivre, l'état de l'art des technologies d'affichage RA, avant de nous focaliser sur les dispositifs ATH et l'utilité des informations RA pour le conducteur.

### **1.7. Diffusion directe et indirecte d'information RA**

Selon Ronald Azuma, deux manières sont possibles pour la diffusion des informations Réalité Augmentée : (1) les technologies optiques, et (2) les technologies vidéos. La différence principale entre les deux méthodes réside dans la visualisation des informations : d'une manière directe en utilisant un système optique ou de manière indirecte lorsqu'un système vidéo est utilisé.

- **Les systèmes d'affichage optique**

La réalité augmentée est affichée à l'aide de miroirs et de lentilles semi-transparentes (R. Azuma et al., 2001). Il s'agit de dispositifs portés sur la tête ou des écrans portables. Un avantage qu'offre un tel système est qu'il n'y a pas de diminution au niveau de la résolution de l'environnement réel. En cas de dysfonctionnement de la partie virtuelle, l'environnement réel reste visible pour l'utilisateur.

- **Les systèmes d'affichage vidéo**

Il s'agit de coupler une vidéo d'un environnement réel avec des informations virtuelles. La première étape nécessite une numérisation de l'environnement réel, puis une fois la réalité reconstituée, les éléments de synthèse lui sont associés dans le cadre des besoins définis. Les systèmes vidéos présentent souvent un champ visuel limité, ce qui peut restreindre les applications (D.W.F. van Krevelen & R. Poelman, 2000). Malgré une diminution conséquente de la résolution réelle, cette technique présente un avantage de souplesse, puisque il est plus simple d'aligner des objets virtuels sur les images d'une vidéo (R. Azuma et al., 2001). Cette technique d'affichage est simple à implémenter et engendre moins de coût qu'un système optique.

L'utilisation d'un système vidéo pour la diffusion d'informations Réalité Augmentée n'est pour l'instant pas envisageable pour une diffusion Full-Windshield (en utilisant directement la surface du pare-brise pour l'affichage d'informations RA). Un désagrément lié à la visualisation indirecte d'informations est le décalage temporel, qui a pour conséquence un

retard du temps de réaction de l'utilisateur. Cependant, une interface secondaire sur le tableau de bord peut être envisagée en utilisant un système d'affichage vidéo pour assister le conducteur dans certaines situations. Ces interfaces sont communément appelées « Affichage Tête Basse » (de l'anglais : « Head Down Display - HDD»). Cependant, ce type d'interfaces engendre un détournement du regard de la route, ainsi qu'un besoin de ré-accommodation.

## 1.8. Les différentes techniques d'affichage

Un moyen de classer ces systèmes RA a été proposé par Bimber et al. (Bimber & Raskar, 2006) en prenant en compte la distance de visualisation par rapport à l'observateur. Cette approche de segmentations en trois catégories distinctes (Figure 1.10) a été également reprise par les auteurs van Krevelen et al. (D.W.F. van Krevelen & R. Poelman, 2000).

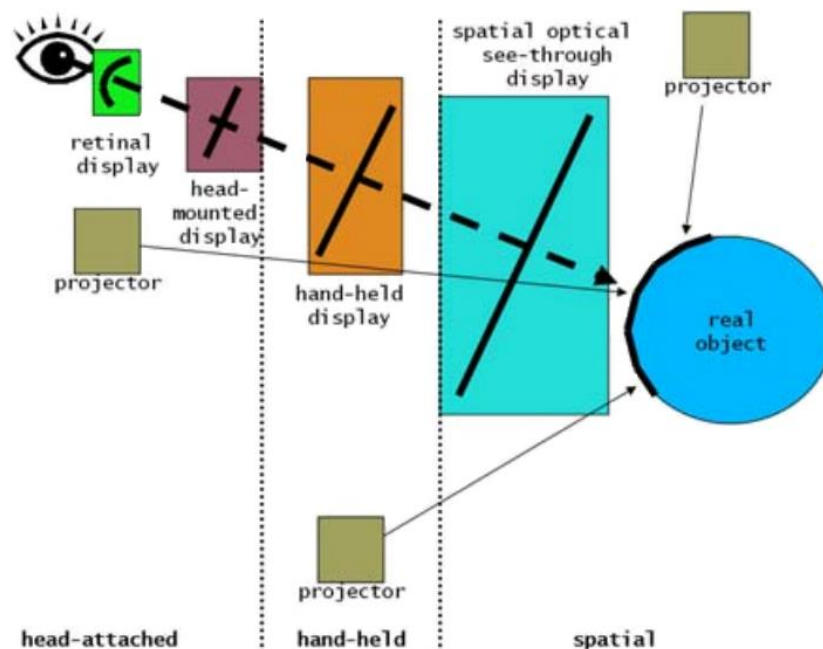


Figure 1.10 Techniques d'affichage (Bimber & Raskar, 2006)

- Les affichages de type casque « Head-Mounted Display- HMD »

C'est un dispositif couplé à la tête de l'utilisateur. Les HMDs peuvent utiliser les deux techniques, optique ou vidéo, définies précédemment.

- Les casques HMD semi-transparentes optiques (Optical see-through HMD) : ils sont constitués d'un écran LCD couplé à un miroir semi-transparent dont le mixage réel et virtuel se fait sur l'œil de l'utilisateur, comme le montre la Figure 1.11 ci-dessous.

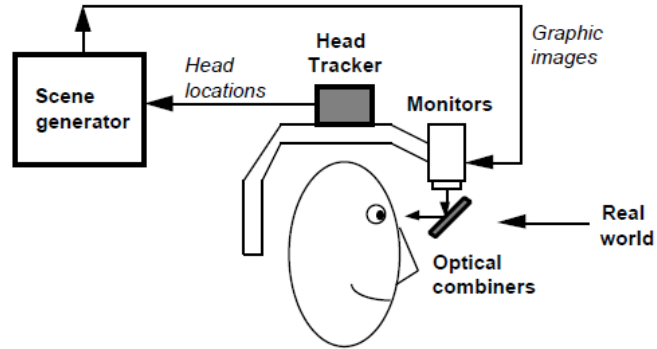


Figure 1.11 Les affichages optiques (R. Azuma, 1995)

Avec ce système, la résolution de l'environnement réel est conservée. De plus, la vision périphérique est maintenue, ce qui permet une meilleure acceptation par l'utilisateur.

- Les casques semi-transparentes vidéos (Video see-through HMD) : un assemblage est effectué à partir de la vidéo capturée à laquelle se superpose le rendu graphique. L'ensemble est ensuite directement présenté à l'utilisateur, comme le montre la Figure 1.12 ci-dessous. L'avantage est que l'alignement est de meilleure qualité vu qu'il n'y a plus la contrainte du temps réel, mais il peut y avoir un conflit sensoriel entre la vision et la proprioception. Ils permettent aussi une meilleure gestion des occultations, et le contrôle total de la vision de l'utilisateur.

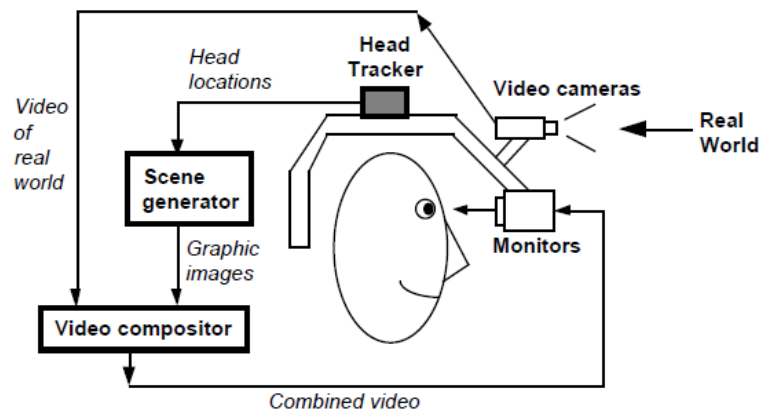


Figure 1.12 Les affichages vidéo (R. Azuma, 1995)

L'utilisation d'un système HMD vidéo dans le monde automobile est contraignante pour plusieurs raisons : la numérisation du monde réel dégrade sa résolution, la visualisation de la scène de conduite ne se fait pas en temps réel, et le champ visuel du conducteur est amoindri. Il existe aussi des caques appelés « Head Mounted Projective Display - HMPD » (cf. Figure 1.13). C'est une variante des HMD, qui présente plusieurs avantages. D'une part, l'information du monde réel n'est pas modifiée puisque les informations virtuelles sont

projetées sur un écran retro-réfléctif. D'autres part, un champ de vision plus large permet de régler les problèmes de distorsions et d'occlusions. Il faut néanmoins gérer convenablement l'alignement des informations. Plusieurs articles ont été publiés sur ce sujet par Hong Hua, une chercheuse à l'université d'Arizona : (Hong Hua, Chunyu Gao, Brown, Ahuja, & Rolland, 2002; Hua & Gao, 2005; Hua, Gao, Biocca, & Rolland, 2001; Hua, Girardot, Gao, & Rolland, 2000).

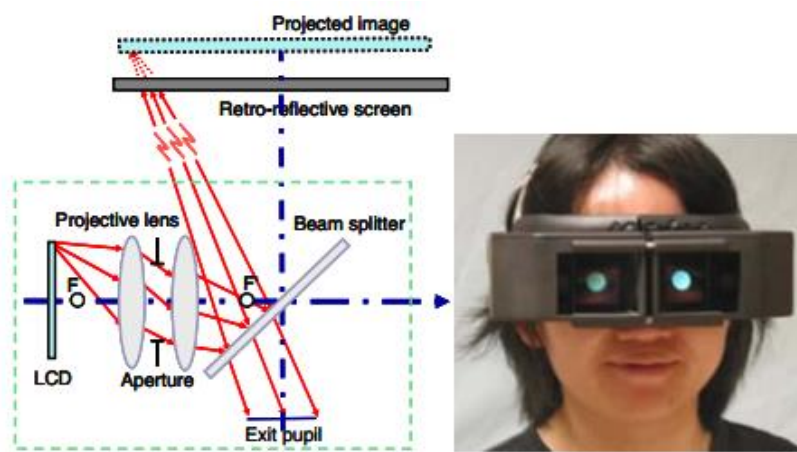


Figure 1.13 Head Mounted Projective Display – HMPD (Hua & Gao, 2005)

- **Affichage sur la rétine « Virtual Retinal Display»**

L'affichage rétinien virtuel, de l'anglais « Virtual Retinal Display – VRD », est un affichage par balayage rétinien qui permet de diriger des rayons lumineux directement dans les yeux. La projection de lumière se fait directement dans la rétine sans qu'elle soit réfléchi sur un autre objet. Ce système a été introduit la première fois par Kazuo Yoshinaka, employé de la société japonaise Nippon Electric (Lancelle, 2001). On retrouve également ce type de système chez MicroVision (« MicroVision, Inc. | Laser beam scanning projection and imaging solutions », s. d.), qui utilise la technique du laser à faible puissance. Cette technique s'affranchit des problèmes de vue de l'utilisateur, du focus de l'œil (distance de regard), n'altère pas la qualité de l'image (vu que la rétine joue le rôle d'écran), et ne provoque pas de problème de luminosité ou de réflexion. MicroVision propose deux solutions : des lunettes capables de projeter des images directement dans la rétine ou le port direct de lentilles Réalité Augmentée. Mi-Sun Lee et son équipe, des chercheurs de l'Institut National de Science et Technologie à Ulsan (Ulsan National Institute of Science and Technology), ont publié un article en 2013 où ils détaillent les matériaux utilisés pour développer cette technologie, et exposent ainsi les résultats des tests réalisés sur la rétine de lapin (Lee et al., 2013).

- **Les Affichage Tête Basse « Head-Down Display-HDD »**

Un Affichage Tête Basse, Head-Down Display en anglais, est une interface secondaire qui nécessite un détournement de regard de l'utilisateur pour consulter les informations affichées. Dans le domaine de l'automobile, un ATH présente plusieurs avantages par rapport à un ATB, comme une présentation de l'information dans le champ visuel central du conducteur sans détournement de son attention de la route (AblaBmeier, Poitschke, Bengler, & Rigoll, 2007; Liu & Wen, 2004; Normark, Tretten, & Gärling, 2009; Sullivan, Bärngman, Adachi, Schoettle, & others, 2004).

- **Les Affichages Tête Haute « Head-Up Display -HUD»**

Le principe repose sur l'utilisation d'un dispositif optique équipé par des surfaces réfléchissantes pour projeter des informations directement dans le champ de vision du conducteur. Dans la partie qui va suivre, nous nous intéressons à l'utilisation de cette technique de visualisation dans le cadre de l'aide visuelle à la conduite automobile.

## **2. Affichage Tête Haute (ATH) pour l'aide avancé à la conduite automobile (ADAS)**

### **2.1. Définition**

Un Affichage Tête Haute, désigne une interface placée directement dans le champ de vision de l'utilisateur, où des informations sont projetées pour faciliter la réalisation de certaines tâches dans un contexte particulier. L'Affichage Tête Haute est un dispositif utilisé initialement par des pilotes d'avions de chasse, et qui se généralise de plus en plus dans le domaine de l'automobile. Il peut servir à projeter des informations utiles, voire critiques, au moment où le conducteur en a le plus besoin.

### **2.2. Aide Avancée à la conduite Automobile – ADAS**

Les systèmes avancés d'aide à la conduite, désignés par l'acronyme ADAS, sont des systèmes embarqués dans le véhicule qui permettent de sécuriser la conduite et d'éviter des dangers. Comme nous l'avons évoqué dans la partie introductive, la perception visuelle est le mécanisme le plus sollicité lors de la conduite automobile. Afin d'éviter une défaillance perceptuelle, plusieurs capteurs sont embarqués dans le véhicule pour surveiller sa dynamique en fonction de l'environnement proche et lointain du conducteur : capteurs proprioceptifs (capteur de vitesse, accéléromètre...) et capteurs extéroceptifs (ultrasons, radars, lidars, caméras, sonars...) (Marouane, 2011). Chaque type de capteur extéroceptif possède une portée et un angle de vue différents. La figure ci-dessous (Figure 1.14) illustre la plage de détection de ces capteurs. Les informations issues de ces capteurs sont fusionnées



et traitées, et les plus pertinentes peuvent être communiquées au conducteur à travers une Interface Homme-Machine (IHM), un (ATB ou ATH) pour rassurer le conducteur et le guider dans ses manœuvres.

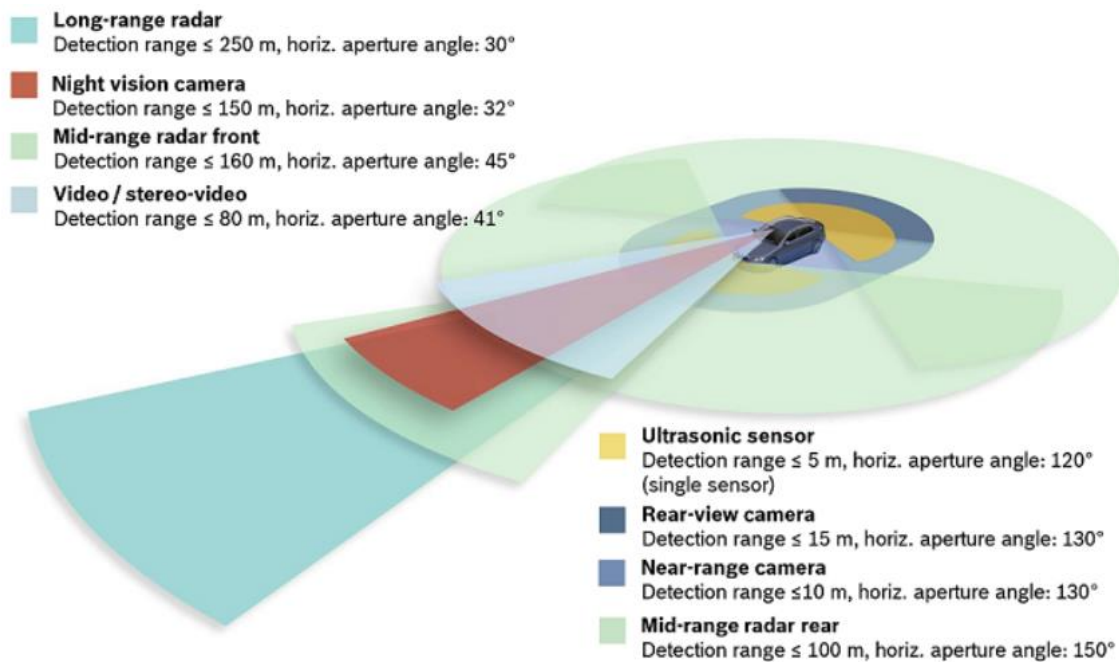


Figure 1.14 Plages de détection des capteurs (Bosch)

Selon Isermann et ses collaborateurs (Isermann, Mannale, & Schmitt, 2010; Soualmi, 2014), les systèmes ADAS peuvent être classés dans trois catégories différentes : (1) Les systèmes ADAS pour la stabilisation du véhicule, (2) Les systèmes ADAS informatifs et préventifs, (3) Les systèmes ADAS actifs agissant sur le contrôle longitudinal et/ou latéral.

### 2.2.1. Les systèmes ADAS pour la stabilisation du véhicule

Ces systèmes peuvent intervenir lors des manœuvres extrêmes pour garder le contrôle du véhicule et stabiliser sa trajectoire. Le développement de ces systèmes a été encouragé par les agences européennes et internationales (New Car Assessment Program : NCAP, Euro NCAP ) afin d'évaluer la sécurité du véhicule. Les systèmes les plus répandus sur les véhicules actuels sont : l'ESP (Electronic Stability Program) et l'ABS (Anti-Blocking System). L'ESP est un correcteur électronique de trajectoire, qui prend en compte l'angle de braquage ainsi que la vitesse du véhicule pour limiter le moment de lacet et garantir la stabilité du véhicule, lors d'un virage ou d'une manœuvre d'évitement d'obstacle (Soualmi, 2014). L'ABS n'intervient que lors d'un freinage brusque pour éviter le blocage des roues. D'autres systèmes de stabilisation ont été proposés dans la littérature, tels que : DYC (Direct Yaw Control), AFS (Active Front Steering), ARS (Active Rear Steering), et LPV (Linear

Parameter Varying). Une revue plus détaillée de ces systèmes est proposé dans la thèse de Soualmi (Soualmi, 2014).

### **2.2.2. Les systèmes ADAS informatifs et préventifs**

Ces systèmes se démocratisent progressivement sur les véhicules de nouvelle génération, avec de plus en plus de fonctionnalités d’alerte. Le système détecte une ou plusieurs informations pertinentes et informe le conducteur de la situation par :

- Des systèmes d’alertes sonores et/ou haptiques
- Des affichages sur des IHM (ATB/ATH) pour l’assistance à la conduite automobile, où plusieurs types d’informations peuvent être affichées (cf. Chapitre 1 .3.5).

### **2.2.3. Les systèmes ADAS actifs agissant sur le contrôle longitudinal et/ou latéral**

Ces systèmes peuvent intervenir directement sur la dynamique du véhicule sans intervention nécessaire du conducteur. L’émergence de ces systèmes est imminente avec des systèmes de copilotes électroniques sur des parties spécifiques du parcours. De nombreuses tâches automatiques seront progressivement intégrées dans les véhicules, jusqu’à l’automatisation complète dans les situations les plus complexes. Plusieurs gammes de véhicules de différents constructeurs proposent des fonctionnalités de régulation de vitesse en autoroute (Adaptive Cruise Control- ACC), de système d’aide au parking, ou alors des fonctionnalités de maintien de voie (Lane Keeping Assist).

## **2.3. Utilité d’un ATH dans le véhicule**

Un ATH peut permettre d’accompagner le conducteur dans toutes les phases de la conduite. Des informations virtuelles peuvent être présentées sur l’ATH pour aider le conducteur à mieux analyser son environnement de conduite. Les informations pertinentes peuvent être adaptées en fonction des besoins du conducteur. En raison d’une forte croissance des systèmes ADAS, les besoins des conducteurs évoluent. Plus le véhicule est équipé de capteurs et de caméras, plus les informations disponibles sont importantes. Une sélection judicieuse de ces informations est nécessaire en fonction de leur utilité à un moment donné, et de leur priorité. Si le véhicule est équipé de plusieurs capteurs et de fonctionnalités ADAS, la RA peut permettre de mieux comprendre ce que propose le système, faciliter la prise en main, et rassurer le conducteur en l’informant des actions entreprises.

Quant à l’affichage d’informations pour les conducteurs et les passagers des véhicules semi-autonomes ou entièrement autonomes, nous pouvons imaginer plusieurs types d’informations susceptibles d’intéresser le conducteur, celui-ci pouvant s’affranchir de certaines règles de conduite (garder ses yeux sur la route et ses mains sur le volant par exemple). La délégation

totale de la conduite est affectée au superviseur intelligent intégré dans le véhicule. Le superviseur peut : échanger des informations avec le conducteur à travers une interface RA interactive, communiquer sur les actions importantes entreprises et maintenir le conducteur au courant de sa sécurité et des dangers potentiels. Lorsqu'une tâche doit être validée par le conducteur, l'interface peut jouer le rôle d'intermédiaire pour faciliter l'interaction entre l'utilisateur et le système superviseur du véhicule. Si le conducteur souhaite continuer à contrôler toutes les actions lui-même, la RA peut l'accompagner dans la compréhension et l'analyse de son environnement à travers les informations récupérées à partir des nombreux capteurs intelligents intégrés au véhicule. Lors de la reprise du contrôle par le conducteur, ce type d'interface peut permettre d'afficher les informations les plus utiles (comme la vitesse autorisée, la priorité, et les obstacles à proximité), afin d'engager les actions tout en sécurité.

### **3. Les Affichages Tête Haute - Réalité Augmentée**

#### **3.1. ATH-RA pour la conduite automobile**

Un Affichage Tête Haute- Réalité Augmentée, comme son nom l'indique, est une combinaison de deux technologies (présentées dans 1.1 ; 2.1). L'ATH permet l'affichage d'informations RA dans le champ visuel central de conduite et en profondeur grâce à la collimation optique. La Réalité Augmentée améliore la perception de l'utilisateur et sa compréhension du monde réel. Les informations virtuelles véhiculées peuvent permettre à l'utilisateur de simplifier ses tâches dans le monde réel et observer plus aisément les objets environnants (Cieutat, 2013). Il y a plusieurs possibilités pour venir enrichir l'espace visuel du conducteur. Inspiré du domaine de l'aviation, les Affichages Têtes Hautes (HUDs) sont les interfaces privilégiées pour ne pas encombrer l'environnement de l'utilisateur (Kim & Dey, 2009; Thomas A. Ranney, 1999). Cependant, certaines difficultés sont à prendre en considération, notamment les problèmes d'alignement des objets virtuels dans l'espace réel ainsi que les limites liées à l'ergonomie et la facilité d'utilisation des systèmes. Nous présentons dans le paragraphe suivant, le principe de fonctionnement avant d'aborder les avantages et les paramètres d'un ATH-RA pour la conduite automobile.

#### **3.2. Principe de fonctionnement**

En automobile, pour projeter la RA, l'ATH-RA peut être présenté de deux manières : en utilisant une interface (lame transparente fixée sur le tableau de bord par exemple) entre le conducteur et le parebrise ou en utilisant directement la surface du parebrise. Dans l'image ci-dessous (Figure 1.15), le schéma résume le principe conceptuel d'un ATH et les différents composants nécessaires pour la visualisation des informations RA.

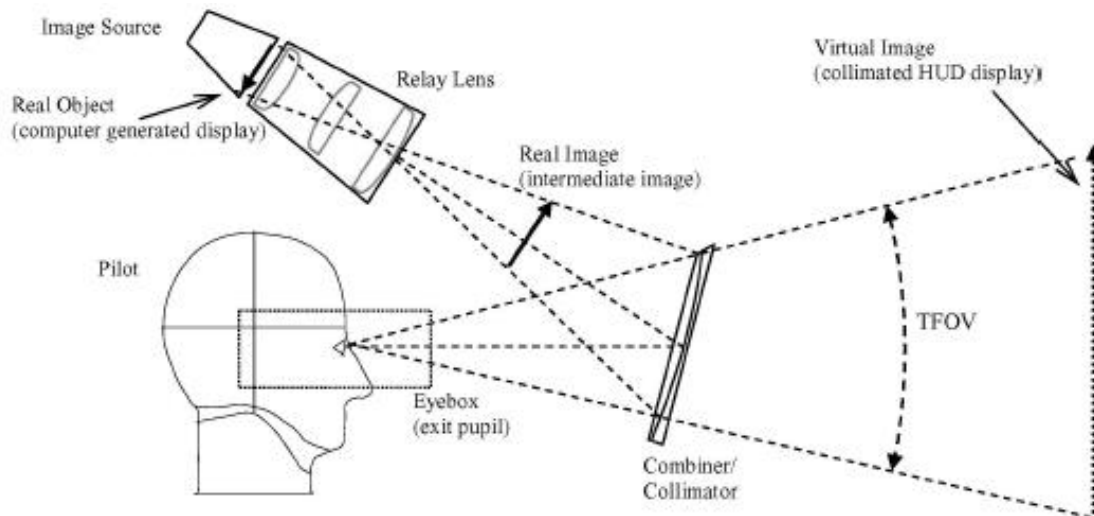


Figure 1.15 Schéma conceptuel HUD de (Brown et al., 2004) repris par (Olwal, 2015)

## La collimation

Le collimateur est un dispositif optique constitué de lentilles permettant la visualisation d'informations virtuelles à l'infini optique, en rendant tous les rayons issus d'une source lumineuse ponctuelle parallèles à l'axe optique (Claverie, Leger, Charbonneau, & Vaïda, 2010). Cette technique est directement inspirée de l'aviation, car l'œil est la plupart du temps focalisé à l'infini optique. C'est pourquoi, le fait de projeter les informations virtuelles à quelques mètres devant le pilote permettrait de faciliter le mécanisme d'accommodation (Peterson, 2005; Peterson & Pinska, 2006). Plusieurs études ont été effectuées dans le domaine de l'aéronautique confirmant le besoin de projeter à l'infini. Ceci permettrait aux pilotes de rester attentifs aux informations de l'environnement et du tableau de bord sans détourner le regard et garantir ainsi un temps de réaction minimal (Todoriki, 1994; Troxell, Harrington, & Perisho, 1997).

Dans le domaine de l'automobile, les objectifs sont les mêmes en termes de sécurité du conducteur mais les besoins sont différents en termes de type d'information et de symbologie. Comme le précise Harkin (Harkin, Cartwright, & Black, 2005), il est important d'examiner l'effet de l'ATH sur les performances des conducteurs dans différentes situations. Il est important de noter que l'environnement externe de conduite est très dense en termes de nombre d'informations, d'obstacles à proximité et de variation de la distance égocentrique pour les différents objets. Le schéma ci-dessous montre le principe d'installation d'un ATH à l'aide d'un combiné optique pour la visualisation de l'information virtuelle dans l'environnement de conduite.

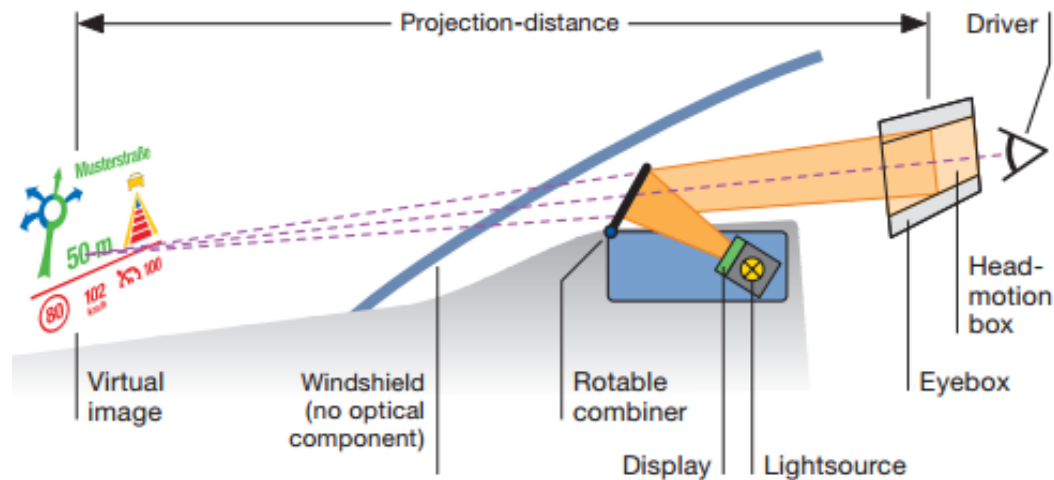


Figure 1.16 Continental Engineering Services-Fact Sheet of HUD Combiner (« Continental Automotive -Head-up Displays – Eying safety and comfort at all times », s. d.)

### 3.3. Avantages d'un ATH-RA

Selon Claverie et ses collaborateurs, un ATH est une technique d'aide cognitive permettant : d'augmenter les capacités naturelles de l'utilisateur en enrichissant l'environnement de conduite, d'améliorer les performances et la sécurité, et d'apporter un confort au conducteur (Claverie et al., 2010). Les différents avantages, mis en avant dans la littérature automobile ou aéronautique, sont résumés dans les catégories ci-dessous.

- **Champ de vision**

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'affichage des informations se fait directement dans le champ de vision du conducteur sans détournement de son regard, ce qui lui permet de rester attentif sur la route. De plus, ce type d'affichage peut permettre d'augmenter le champ visuel du conducteur en lui affichant des informations situées en dehors de son champ de vision (Claverie et al., 2010; Le Blaye & Marchand, 2005).

- **Détection d'obstacles**

Pour faciliter l'évitement des obstacles et gagner en temps de réaction du conducteur, les capteurs intégrés dans le véhicule permettent de faciliter la détection de ces obstacles et l'affichage se fait aussitôt sur l'ATH-RA.

- **Confort visuel**

La prise en compte des facteurs physiologique humains est importante pour garantir un confort visuel humain. Ce type d'interface peut faciliter la perception pendant la conduite avec, notamment, la réduction du temps d'accommodation.

- **Charge mentale**

Lorsque les informations projetées sur l'ATH-RA sont sélectionnées de manière judicieuse en fonction du besoin du conducteur, la charge mentale du conducteur se voit diminuée (en comparaison avec un ATB).

- **Prise de décision**

Un ATH-RA peut aider l'utilisateur dans la prise de décision afin qu'il puisse réagir rapidement. Une meilleure aptitude à la prise de décision avec un ATH-RA a été démontrée dans la littérature (Claverie et al., 2010; Roumes, Fornette, Valot, & Le Blaye, 2001).

- **Interaction avec le conducteur**

Une interface de type ATH-RA offre la possibilité d'interagir facilement avec le conducteur et d'une manière sûre. Elle peut aussi lui permettre d'avoir accès rapidement aux informations (Betancur, 2011).

- **Risque de distraction**

L'affichage des informations de navigation par exemple, réduit considérablement les risques de distraction par rapport au GPS traditionnel/Smartphone, à condition de ne pas occulter les autres éléments importants dans la scène de conduite. Les informations d'aide à la conduite, telles que les alertes de danger, les obstacles, ou le rappel de la signalisation, peuvent offrir une détection plus rapide et permettent de gagner en temps de réaction.

### **3.4. Les paramètres d'affichage**

Une interface RA pour l'aide à la conduite doit cibler les besoins de l'utilisateur et prendre en compte ses limites physiologiques et cognitives. Voici une liste non exhaustive des paramètres d'affichage nécessaires pour la mise en place d'un ATH-RA : la localisation d'information, une symbologie conforme, le champ visuel, les aspects colorimétriques (la luminance, le contraste, la luminosité), la fusion d'information, la profondeur d'affichage (la distance de projection), la calibration et les réglages par rapport à la position du conducteur, et l'adaptation en fonction des conditions de visibilité.

### **3.5. Applications en automobile et types d'informations**

Plusieurs types d'informations peuvent être affichés sur un ATH-RA dans le cadre de l'assistance à la conduite automobile. De plus en plus d'applications sont développées et enrichies pour la conduite automobile (Christian et al., 2004; George et al., 2012; Kim & Dey, 2009; Narzt et al., 2003, 2006; Tonnis & Klinker, 2006; Tonnis, Sandor, Lange, & Bubb, 2005). Nous les avons réparties en 5 catégories distinctes, décrites ci-dessous, qui peuvent être en lien avec la tâche de conduite principale, secondaire, ou tertiaire.

### **3.5.1. Informations liées au véhicule**

Il s'agit d'informations placées habituellement sur le tableau de bord des véhicules : vitesse, niveau du carburant, niveau de l'huile, température, voyant de dysfonctionnement... Ces informations peuvent être couplées aux informations environnementales pour proposer des solutions adaptées en cas de dysfonctionnement (proposer une station essence avant une panne de carburant par exemple).

### **3.5.2. Informations environnementales**

La RA peut aider à mettre en avant la signalisation du code de la route (vitesse, priorité, dépassement...), les obstacles à proximité (ou qui se dirige vers le véhicule), et les bordures de la route. Ces informations peuvent être couplées aux paramètres de conduite soit pour rassurer le conducteur ou bien l'informer si une action entreprise engendre un risque (peut s'appliquer, par exemple, pour signaler un dépassement dangereux lors de l'activation du clignotant par le conducteur).

### **3.5.3. Informations liées à l'itinéraire**

Elles concernent les informations GPS pour l'assistance à la navigation, qui sont habituellement affichées sur des interfaces de type ATB (IHM du véhicule, Smartphone, un dispositif GPS). Plusieurs approches de la littérature sont résumées dans (George et al., 2012).



Figure 1.17 (Narzt et al., 2003, 2004)

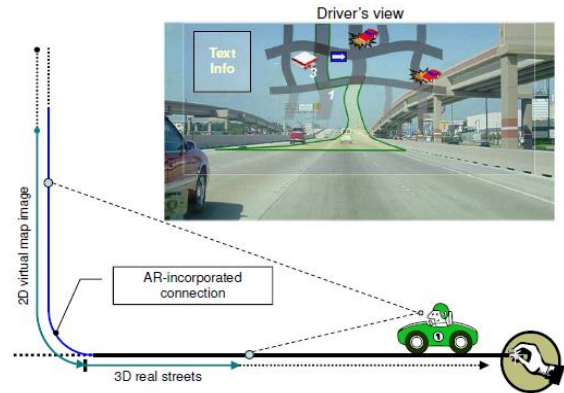


Figure 1.18 (Kim & Dey, 2009)

### 3.5.4. Informations de supervision de conduite semi-autonome et autonome

L'interface peut être utilisée pour afficher des informations pertinentes pour la reprise de contrôle du véhicule en toute sécurité par le conducteur (exemples : la priorité, la vitesse limite, l'itinéraire...).

### 3.5.5. Informations facultatives ou secondaires

Il peut s'agir d'annotations sur l'environnement de conduite selon les préférences du conducteur. A partir du moment où le véhicule est connecté, il peut offrir une infinité de possibilités d'applications (annotations des points d'intérêts, publicité, guide touristique...).

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé, les généralités de la Réalité Augmentée, les définitions fondamentales, et les applications dans différents domaines. Ensuite, nous avons introduit l'intérêt d'un Affichage Tête Haute pour l'aide avancée à la conduite automobile en situant le contexte applicatif. Puis nous avons vu dans la dernière partie de ce chapitre, le principe de fonctionnement d'un ATH-RA, ses avantages, ses paramètres d'affichage, et ses différentes applications en automobile. Nous avons vu qu'un affichage ATH-RA peut agir comme un système ADAS visuel, cependant avant d'implémenter ce système il faudrait comprendre comment les informations sont perçues et interprétées par les organes perceptifs, et comment on peut assister le conducteur dans la prise de décision. C'est justement l'objet du chapitre suivant, où un état de l'art pluridisciplinaire est présenté pour éclairer le lecteur sur les principes fondamentaux à prendre en compte lors de la mise en place d'un ATH-RA.





# Chapitre 2 - Facteurs Humains et Ergonomie des Interfaces Conducteurs

Ce chapitre est consacré à la présentation des mécanismes sensoriels les plus utilisés dans la tâche de conduite automobile, de certains facteurs humains et de quelques principes ergonomiques. Il est important de se familiariser avec ces éléments car d'une part, cela montre la capacité d'adaptation et d'apprentissage du conducteur, mais d'autre part, cela nous rappelle ses capacités limitées ainsi que les risques d'erreur. Les principes ergonomiques expliquent comment intégrer l'utilisateur dans la boucle de conception et de validation des interfaces.

## 1. La Perception Humaine

### 1.1. La vision humaine

#### 1.1.1. L'œil humain

L'œil humain est un organe sensoriel du système visuel de forme sphérique, dont le fonctionnement est très complexe. Il permet de capter les images d'une manière optimale en fonction du stimulus et des variables environnementales en ajustant ses différents composants. Une fois que l'information est décodée, elle est transformée en message nerveux puis elle est envoyée à travers le nerf optique au cortex visuel pour en faire une interprétation et l'associer à d'autres informations enregistrées dans d'autres parties du cerveau. L'œil humain est capable de voir dans une gamme d'environ sept unités logarithmiques d'intensités lumineuses, et le spectre du visible s'étend d'environ 380nm à 780nm selon la commission internationale de l'éclairage (Bruce & Patrick R. Green, 1993). La Figure 2.1 montre les composants physiologiques principaux de l'œil humain, et le rôle de chaque composant dans la perception visuelle est expliqué ci-après.

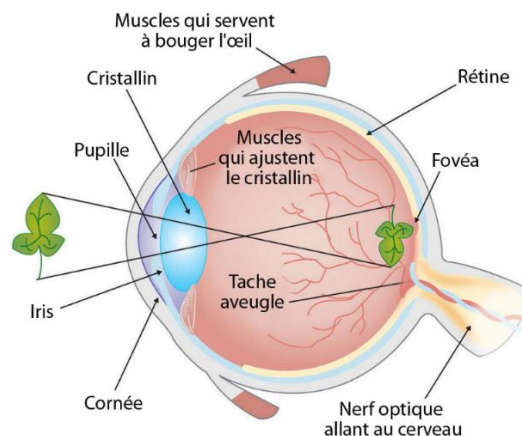


Figure 2.1 Œil humain (Castaneda, Gonzales, & Baluch, 2016)

## **La pupille et l'iris**

C'est par la pupille que pénètrent en premier lieu les rayons lumineux, et sa dimension est modulable en fonction de l'intensité lumineuse, grâce à l'iris qui s'ajuste en permanence en fonction de la luminosité ambiante pour laisser passer la bonne quantité de lumière. Lorsque le niveau de luminosité est faible, une vision nette sur la rétine est possible grâce à la dilatation de l'iris, qui permet de laisser passer plus de rayons à travers la pupille. Le diamètre de la pupille peut varier entre 2mm et 8mm pour les jeunes personnes, et peut également subir de légères variations dans certaines situations comme dans le cas d'une forte émotion, surprise, ou lorsque le sujet se retrouve dans une situation de danger. Le temps de latence pour une contraction pupillaire est généralement compris entre 0.2 et 0.5 secondes lorsqu'il y a une augmentation de la lumière (Damien Gatinel, 2015).

## **La cornée**

C'est l'enveloppe externe de l'œil qui permet de le protéger. Elle se compose de plusieurs couches transparentes et son rôle est de focaliser les rayons lumineux sur le cristallin.

## **Le cristallin**

Le cristallin est un mécanisme physiologique qui permet une déformation géométrique grâce aux muscles ciliaires. Cette déformation permet d'adapter la puissance focale en fonction de la distance de perception dans une gamme de 15 dioptries environ pour des jeunes personnes, mais qui diminue avec l'âge. Le cristallin est donc responsable de l'accommodation de l'œil et par extension la vergence des yeux, car la direction des yeux doit se réadapter pour une précision maximale avec la modification de la profondeur du point fixé.

## **La rétine**

La rétine est un tissu neuronal qui intègre différentes épaisseurs de cellules. Lorsque l'information visuelle arrive au niveau de la rétine, elle traverse ces couches neuronales qui la composent : les cellules ganglionnaires, les cellules amacrines, les cellules bipolaires, les cellules horizontales ainsi qu'une couche de photorécepteurs sensoriels (cf. Figure 2.2). Cette dernière couche des cellules sensorielles comprend environ 130 millions de cellules : 95% de bâtonnets et 5% de cônes, qui sont réparties de manière non homogène sur la couche postérieure de la rétine (cf. Figure 2.3).

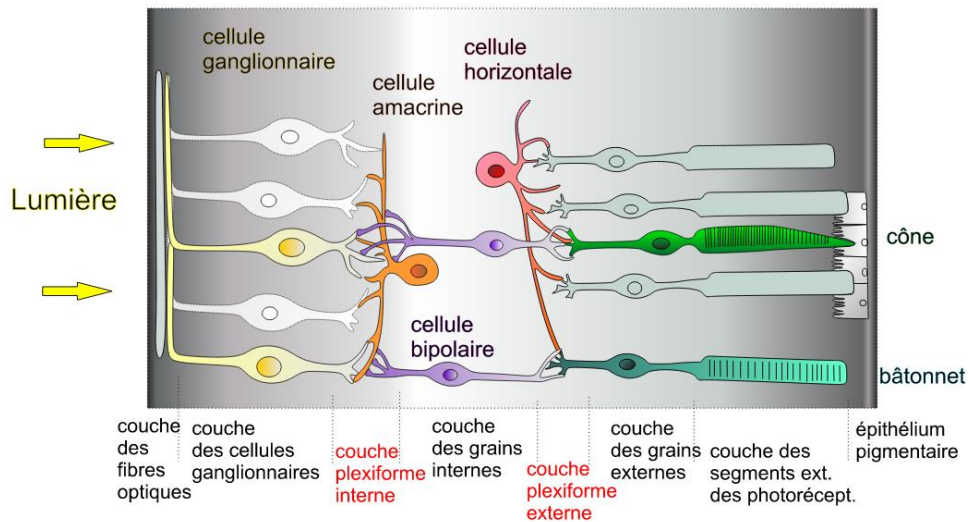


Figure 2.2 Structure de la rétine (Boeck, 2016)

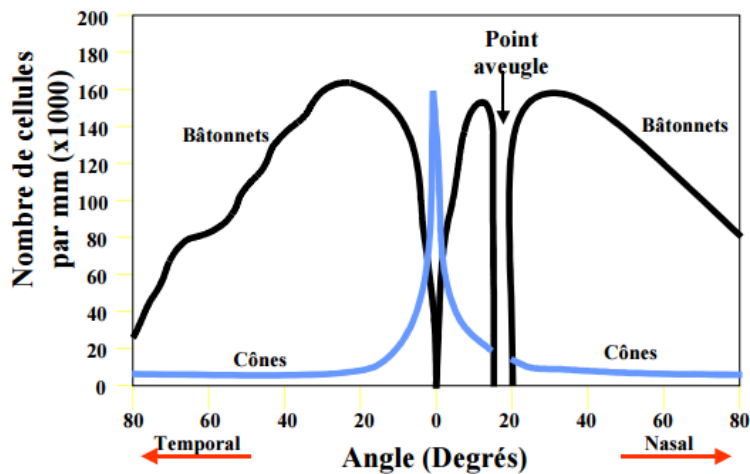


Figure 2.3 Répartition des photorécepteurs sur la rétine (J. Weiss, 1998)

## Le nerf optique

Au niveau de la rétine, l'image reçue est décodée et transformée en message nerveux qui sera envoyé par le nerf optique vers le cortex visuel du cerveau, spécialisé dans le traitement de ces informations.

## La tache aveugle

Comme son nom l'indique, c'est une zone où l'information visuelle n'est pas captée, car elle se situe au niveau de la base du nerf optique et ne contient aucun photorécepteur. Elle est également appelée « papille ». Quand l'image arrive au cerveau, il complète l'information manquante.

### 1.1.2. La sensibilité spectrale des photorécepteurs

Chaque type de photorécepteur contient un pigment différent, sensible à une certaine plage de longueurs d'ondes. Il existe 3 types de cônes, chaque cône étant pigmenté d'une opsine différente pour décoder les informations lumineuses à différentes longueur d'ondes : bleu (420nm), rouge (560nm) et vert (530nm) cf. Figure 2.4. La zone la plus riche en cônes est appelée « la macula lutea » (la tache jaune), et elle contient une fovéa. Les cônes, concentrés principalement autour de la fovéa, sont actifs lorsque les conditions lumineuses sont suffisantes pour les stimuler. La densité de concentration de cônes décroît lorsqu'on s'éloigne du centre de la rétine (Bruce & Patrick R. Green, 1993). Les bâtonnets sont eux absents dans le centre de la rétine, mais leur densité augmente avec l'éloignement de la zone périfovéale. Les bâtonnets, en revanche, contiennent tous la rhodopsine comme pigment, ce qui leur permet d'être très sensible à la lumière et de fonctionner même en faible intensité lumineuse. Ils fonctionnent sur tout le spectre du domaine du visible, avec un pic de stimulation autour de 500 nm. Les informations issues des différents photorécepteurs sont toutes combinées au niveau du cerveau.

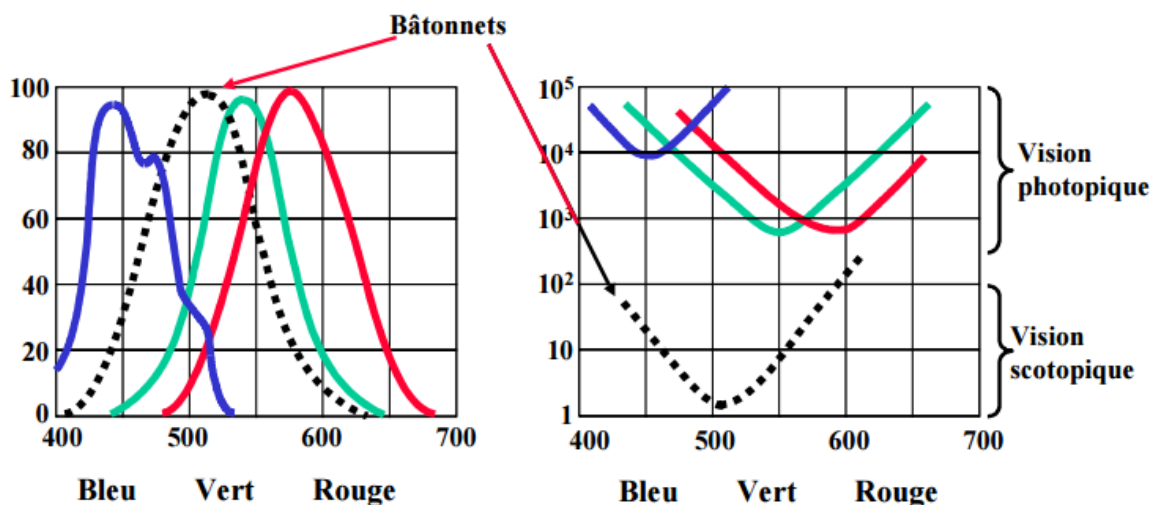


Figure 2.4 Sensibilités lumineuses des cônes et bâtonnets (J. Weiss, 1998)

### 1.1.3. Caractéristiques fondamentales de la perception visuelle

#### La fonctionnalité d'adaptation

Les caractéristiques physiologiques de l'œil permettent une flexibilité et une adaptation aux nombreux paramètres environnementaux : l'accoutumance aux intensités lumineuses, l'adaptation chromatique, la sensibilité au contraste et à la luminance...

## L'acuité visuelle

Elle est définie comme la capacité à détecter de minuscules structures spatiales (Bruce & Patrick R. Green, 1993). Elle permet d'analyser les détails les plus fins. Elle est maximale dans la zone fovéale.

## La profondeur de champ

La profondeur de champ est une plage de distances où l'image formée sur la rétine est nette (Bruce & Patrick R. Green, 1993).

## Le champ visuel de l'œil humain

Lorsque la tête est immobile, le champ visuel monoculaire de chaque œil correspond à une plage entre 94 et 110°. Le chevauchement du champ visuel gauche et du champ visuel droit dans la vision centrale est appelé le champ visuel binoculaire et il couvre une plage de 120° environ. Dans la Figure 2.5 ci-dessous, nous pouvons voir une représentation du champ visuel avec les zones de : lecture, reconnaissance des symboles, et discrimination des couleurs.

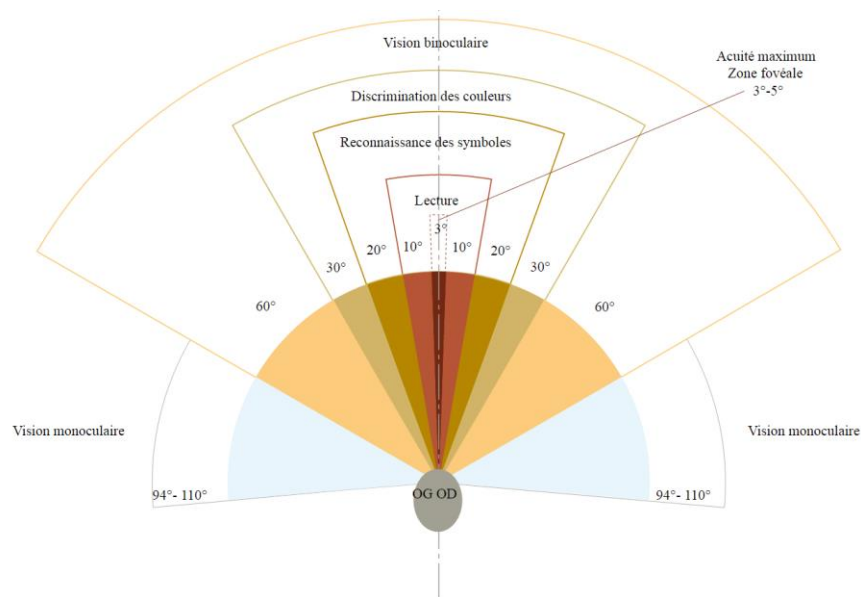


Figure 2.5 (« Schéma du champ visuel humain », 2010)

Dans la figure ci-dessous (Figure 2.6), quatre zones différentes du champ visuel sont distinguées. L'acuité visuelle maximale se situe dans la zone fovéale à 3° environ. L'observateur adapte en permanence la direction de son regard pour récupérer l'information visuelle dans cet axe fovéal et distinguer ainsi les plus fins détails. Dans la zone de veille attentive les yeux sont réorientés sans recours aux mouvements de la tête. Par contre, ces mouvements de têtes sont nécessaires dans la zone d'impression induite. La dernière zone

perceptible est la zone latérale, qui contribue à l'appréciation des distances et du mouvement, et permet de détecter des éléments environnements.

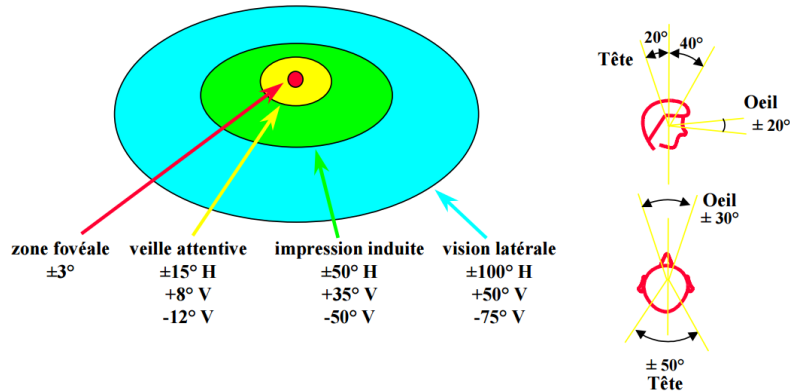


Figure 2.6 Différentes zones d'action de la vision oculaire (J. Weiss, 1998)

Lorsqu'un observateur est en mouvement, le champ visuel se réduit avec l'augmentation de la vitesse de déplacement. En automobile, lorsque le conducteur est à l'état statique, ou roule à une vitesse relativement faible le champ visuel avoisine les 180°. Cependant, à 90 km/h le champ visuel est environ de 90° (cf.

Figure 2.8). En réalité, l'augmentation de la vitesse engendre la génération d'un flux important d'images que le cerveau ne peut pas traiter entièrement. Par conséquent, les informations périphériques sont limitées pour traiter celles qui se rapprochent le plus de la vision centrale.

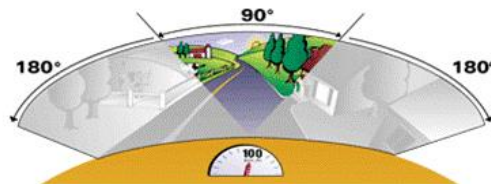


Figure 2.7 Champ visuel statique à 180° et 90° à une vitesse de 90km/h (Direction des transports terrestres, 2008)

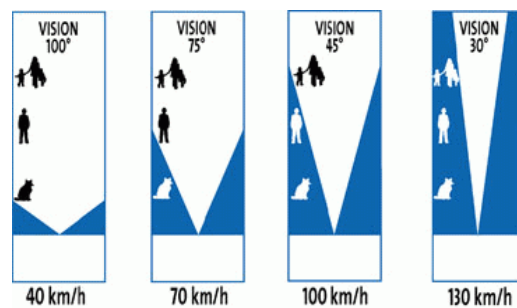


Figure 2.8 Champs visuels en fonction de la vitesse du véhicule

(La vitesse - Code de la route, 2013)

## **Les saccades visuelles**

Les saccades visuelles sont des changements dans la direction de regard afin de ramener l'objet d'intérêt au centre de la rétine. La saccade est un mouvement très rapide qui n'engendre pas de modification dans la profondeur du regard (Dodge, 1903; R John Leigh, 2006; Marine Vernet, 2009).

## **La vergence**

La vergence est le processus du changement de la profondeur du regard (Marine Vernet, 2009). La distance de vergence est la distance de convergence des yeux pour que l'image coïncident dans les fovéas des yeux (Shibata, Kim, Hoffman, & Banks, 2011). La convergence est efficace pour les distances courtes (Cutting, 1997; Lie, 1965; Von Hofsten, 1976). A partir d'une certaine distance, de 6m environ, l'angle de convergence est trop petit pour être utilisable (Shibata et al., 2011).

## **L'accommodation**

La distance d'accommodation est la distance entre les yeux de l'observateur et l'objet observé. Lorsqu'un observateur change le point de regard dans l'espace, une accommodation des yeux est nécessaire pour percevoir nettement l'objet sur la rétine. L'accommodation est la capacité de l'œil à s'ajuster à sa distance focale (Gupta, 2004). Elle concerne la modification de la forme du cristallin en fonction de la distance de l'objet regardé. Cet indice est plus efficace pour les courtes distances (Vishton & Cutting, 1995). Lorsqu'un objet est proche, la forme du cristallin s'épaissit avec la contraction des muscles ciliaires, ce qui augmente la courbure et la puissance focale du cristallin pour permettre une bonne focalisation. Lorsque les muscles ciliaires sont complètement relâchés, le cristallin s'aplatit et l'œil est réglé sur l'infini (Bruce & Patrick R. Green, 1993).

## **Le point de repos de l'accommodation « Dark Focus »**

C'est la distance de focalisation lorsque l'utilisateur ne se concentre sur aucun objet, comme c'est le cas dans le noir (Gupta, 2004; Tufano, 1997). Cette distance est relativement proche et peut se mesurer à l'aide d'un optomètre (Gupta, 2004; Jaschinski-Kruza, 1991; J. Norman & Ehrlich, 1986; Tufano, 1997). Avec la diminution de la visibilité d'un stimulus, l'accommodation se réduit et se rapproche du point de repos de l'accommodation « Dark Focus » progressivement. La précision de l'accommodation dépend de deux facteurs : la qualité du stimulus et la distance de ce point de repos qui est propre à chaque individu (Mershon & Amerson, 1980).



## Lien entre la vergence et l'accommodation

L'accommodation et la vergence sont deux indices fortement liés et ils sont pertinents pour l'estimation de la profondeur des objets pour des distances inférieures à 3.5m (Cutting, 1997; Kersten & Legge, 1983; Rebetez, 2003).

### 1.1.4. L'intensité lumineuse et les types de vision

L'œil humain est capable de percevoir et de s'auto-adapter aux conditions lumineuses grâce aux mécanismes physiologiques embarqués. Selon l'intensité lumineuse, l'environnement n'est pas exactement perçu de la même manière car les pigments des photorécepteurs ne sont pas activés de la même manière. Dans la figure ci-dessous (Figure 2.9), une description générale des dynamiques de luminances communément rencontrée par l'œil humain est illustrée.

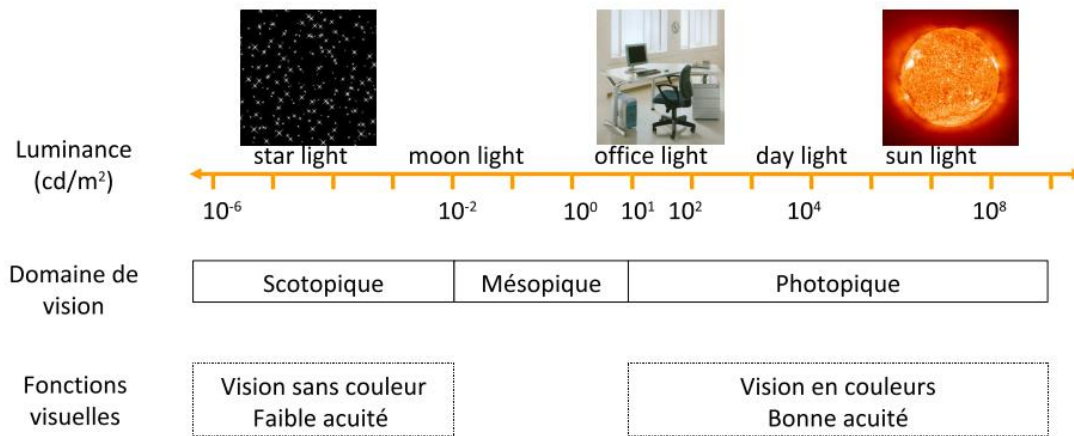


Figure 2.9 Dynamique de luminance de l'œil humain (Spillmann & Werner, 2012)

- **La vision photopique**

Il s'agit d'une vision avec une intensité lumineuse élevée (éclairage supérieur à 50 lux selon Damien Gatinel, 2015), ce qui correspond à l'ambiance lumineuse extérieure durant la journée, ou bien une vision artificielle avec un niveau de luminosité assez important (Army Aviation, s. d.).

- **La vision mésopique**

Elle concerne une ambiance peu lumineuse (lorsque le seuil d'éclairage est compris entre 0.05 et 50 lux selon Damien Gatinel, 2015), comme c'est le cas à l'aube, au crépuscule et pendant la pleine lune. Pendant la vision mésopique, les cônes et les bâtonnets sont simultanément utilisés pour observer les objets dans leur globalité, sans forcément pouvoir distinguer leurs détails puisque l'acuité visuelle est réduite.

- **La vision scotopique**

En dessous d'un certain seuil d'intensité lumineuse (éclairage inférieur à 0.05 lux selon Damien Gatinel, 2015), les cônes ne sont plus utilisés, ce qui se traduit par une acuité visuelle médiocre, et une mauvaise perception colorimétrique.

### 1.1.5. Fonctionnement des photorécepteurs avec la variation de l'intensité lumineuse

En condition photopique, les cônes sont totalement opérationnels pour distinguer les couleurs et les détails et permettent une grande acuité visuelle. À l'inverse, Les bâtonnets fonctionnent d'une manière optimale en basse luminosité (condition scotopique), et permettent de discerner convenablement les nuances de gris. Cependant, l'acuité visuelle se trouve fortement réduite par rapport à la condition photopique. En condition mésopique, l'intensité lumineuse est trop basse pour garantir un fonctionnement optimal des cônes, l'acuité visuelle se trouve donc réduite ainsi que la capacité à distinguer les couleurs. Cependant, ces informations sont combinées avec celles issues des bâtonnets en termes d'intensité du niveau de gris. Dans le Tableau 2.1, une synthèse des paramètres de la vision en fonction des conditions lumineuses est résumée.

Tableau 2.1. Spécificité visuelle et condition lumineuse

<i>Condition d'intensité lumineuse</i>	<i>Niveau de luminosité</i>	<i>Technique de visualisation</i>	<i>Perception de la couleur</i>	<i>Les récepteurs ciliaires utilisés</i>	<i>Meilleure acuité visuelle</i>
<i>Photopique</i>	Haut	Centrale	Bien	Cônes	20/20
<i>Mésopique</i>	Moyen/Bas	Centrale/Par scan	Moyenne	Cônes et bâtonnets	varie
<i>Scotopique</i>	Bas	Par scan	Absente	Bâtonnets	20/200

### 1.1.6. La perception de la profondeur

La perception de la profondeur est possible grâce à la combinaison de plusieurs indices physiologiques et les indices visuelles. La synthèse de ces indices est représentée dans la Figure 2.10 ci-dessous.

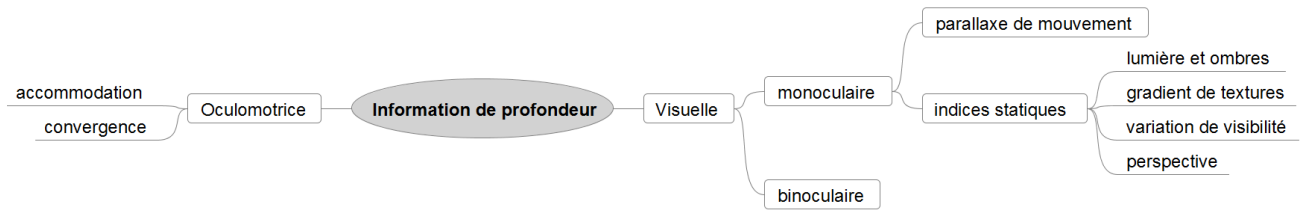


Figure 2.10 Les indices visuels

## Les indices visuels

Pour voir les reliefs, le cerveau interprète les indices présents dans les images. On parle d'indice monoculaire lorsque l'information provient d'un seul œil, et d'indice binoculaire lorsque l'information provient des deux yeux pour la perception de la profondeur (Kemeny & Panerai, 2003).

### La vision binoculaire

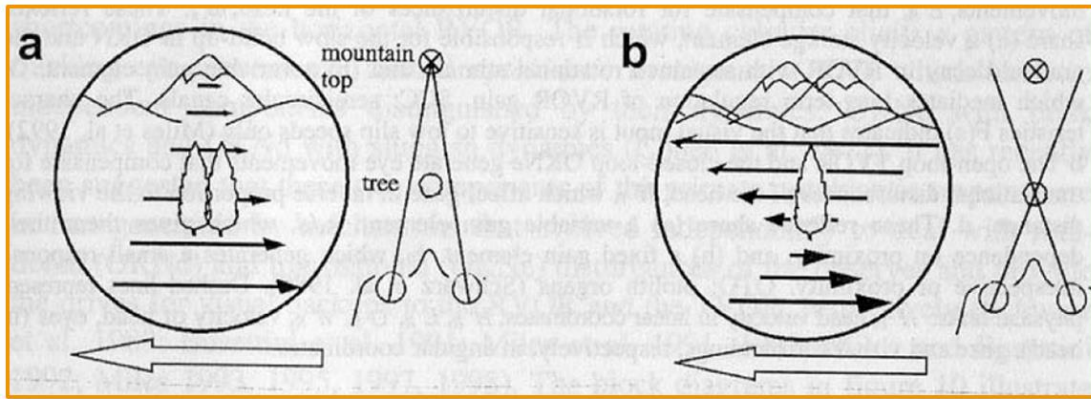
Elle est possible grâce aux deux images légèrement différentes, formées dans la rétine : « la disparité rétinienne ». Elle résulte des deux images captées au même moment mais avec un léger décalage horizontal qui correspond à la différence de point de vue des deux yeux. Cette légère différence permet de calculer la disparité rétinienne entre les deux images reçues par les rétines, et de fournir les distances relatives des objets.

### La vision monoculaire

Dans l'image 2D fournie par chaque œil, nous pouvons distinguer plusieurs indices statiques ou dynamiques.

#### La parallaxe de mouvement

La parallaxe de mouvement est un indice monoculaire pour la perception de la profondeur : c'est le changement optique du champ visuel d'un observateur (E. J. Gibson, Gibson, Smith, & Flock, 1959). Il existe deux catégories de parallaxe de mouvement : la parallaxe de mouvement de l'objet et la parallaxe de mouvement de l'observateur (J. J. Gibson, 1968).



- a. Mouvement apparent en direction opposé
- b. Même sens pour les éléments derrière l'arbre et sens inverse pour les objets situés devant l'arbre

Figure 2.11 Parallaxe de mouvement (Rebetz, 2003; Sandini, Panerai, & Miles, 2001)

## Le flux visuel optique

Le flux optique est défini par Gibson en 1950 dans « The perception of the visual world » (J. J. Gibson, 1950), comme un indice visuel fortement impliqué en locomotion. Il traduit l'observation d'un ensemble de champ de vecteurs représentant la résultante des mouvements de translation et de rotation. La perception du flux optique permet d'estimer la vitesse et la direction du mouvement, car le mouvement de l'image sur la rétine concerne la projection des vitesses de l'espace sur la rétine (Braillon, 2007). Il varie en fonction de la vitesse de l'observateur, des objets perçus (vitesse, forme...). Le flux optique est également utilisé pour voir la forme des objets. Durant la conduite automobile le flux optique est un indice fortement impliqué dans la détermination du mouvement propre. Il permet, par exemple, d'estimer un délai avant une collision (Time-To-Collision -TTC) (Mas, 2012).

Tableau 2.2. Observation du flux optique avec les mouvements de l'observateur (Warren & Hannon, 1990)



Figure 2.12 Champ de vitesse instantanée produit par la translation d'un observateur



Figure 2.13 Champ de vitesse produit par la rotation de l'œil vers le bas et la droite



Figure 2.14 Champ de vitesse produit par une combinaison de translation et de rotation

### Les indices monoculaires statiques

Ce sont des indices picturaux qu'on peut distinguer facilement dans les images 2D ou dans les dessins : variation de lumière et ombres, gradient de texture, perspective géométrique, taille relative...

### Interprétation des informations visuelles

Les informations visuelles récupérées par le cerveau sont traitées en fonction de l'expérience de chacun. Les informations déjà apprises et stockées en mémoire vont intervenir dans la phase d'interprétation (cf. Figure 2.15).

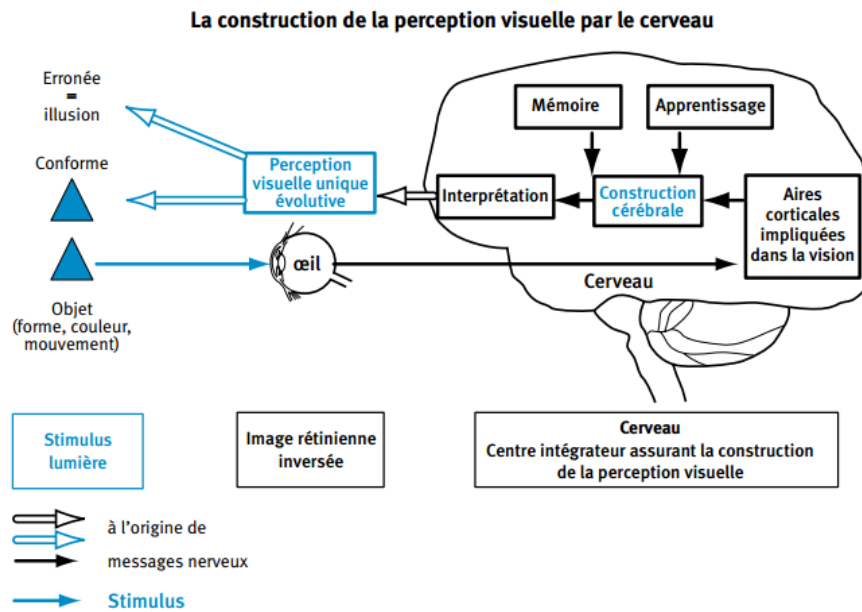


Figure 2.15 Schéma simpliste de la perception visuelle (Académie en ligne, s. d.)

## Incohérence des indices visuels

Comme indiqué précédemment, l'observateur se base sur les informations récupérées grâce à tous les indices présents dans la scène visuelle. Il arrive parfois que ces indices rentrent en contradiction et c'est alors au cerveau de prendre une décision sur l'interprétation de l'image. Cette contradiction entre les indices visuels peut générer plusieurs problèmes, notamment : l'inconfort visuel de l'utilisateur, la perception d'images doubles à cause de l'incapacité de fusion binoculaire, l'exagération ou sous-estimation de la profondeur des objets (Southard, 1993).

### 1.2. L'oreille humaine

L'oreille est un organe sensoriel qui se décompose en trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne (cf. Figure 2.16).

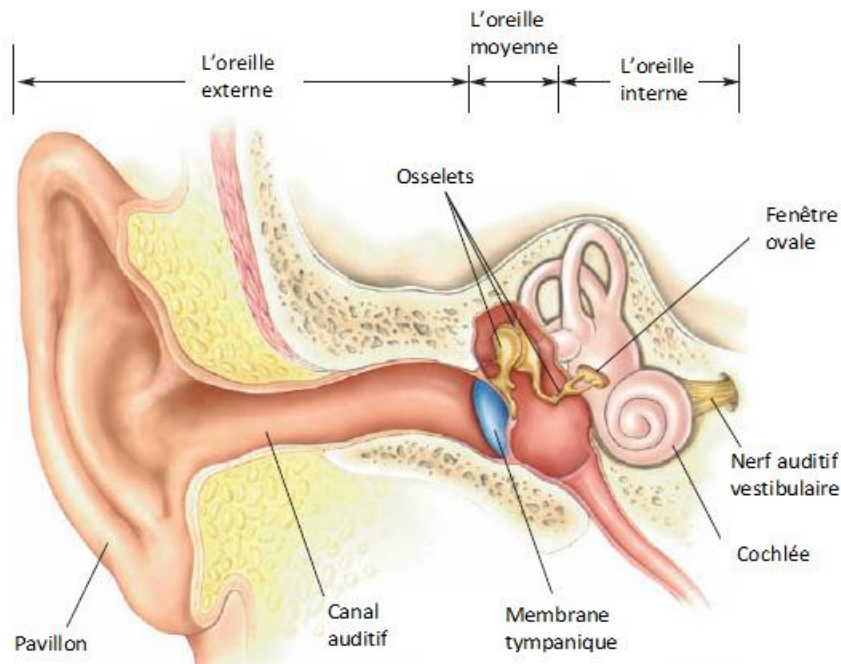


Figure 2.16 L'oreille humaine (adaptation de Bear, Connors, & Paradiso, 2007)

### 1.2.1. L'oreille externe

L'oreille externe comprend deux composants principaux : le pavillon et le canal auditif. Le pavillon capte et amplifie les ondes sonores puis l'information est transmise à l'oreille moyenne à travers le canal auditif. L'audition est fortement impliquée durant la conduite automobile. Elle permet au conducteur, par exemple, de détecter si le régime moteur est bon, sans quoi le passage à la vitesse supérieur est nécessaire. Le son émis par les autres véhicules permet leur détection, et la variation du son permet d'estimer leur distance.

### 1.2.2. L'oreille moyenne

L'oreille moyenne joue le rôle d'intermédiaire entre l'oreille externe et l'oreille interne. Elle se compose de la membrane tympanique et des osselets. La membrane tympanique récupère les vibrations sonores captées via l'oreille externe, et les osselets (le marteau, l'enclume et l'étrier) assurent la transmission des vibrations vers la cochlée au niveau de l'oreille interne.

### 1.2.3. L'oreille interne

Deux organes sensoriels constituent l'oreille interne : le canal auditif et le système vestibulaire. En ce qui concerne l'audition, c'est la cochlée qui convertit les vibrations sonores en signal électrique pour les envoyer au cerveau via le nerf auditif. Quant au deuxième organe (le système vestibulaire), il est en charge du maintien de l'équilibre et de la détection des déplacements dans l'espace.

## Le système vestibulaire

Le système vestibulaire est situé dans l'oreille interne et possède cinq types de capteurs sensoriels qui se distinguent en deux catégories : les organes otolithiques et les canaux semi-circulaires (cf. Figure 2.17). Les organes otolithiques détectent les accélérations linéaires de la tête dans l'espace. Ils se composent du saccule, responsable de la détection de l'accélération linéaire verticale, et de l'utricule qui est responsable de la détection de l'accélération linéaire horizontale. Les canaux semi-circulaires sont au nombre de trois : le CSC vertical antérieur, le CSC vertical postérieur et le CSC horizontal. Ils sont capables de détecter les accélérations angulaires de la tête (rotation de la tête). Les plans et axes de rotation du corps humain sont représentés dans la Figure 2.18 ci-après.

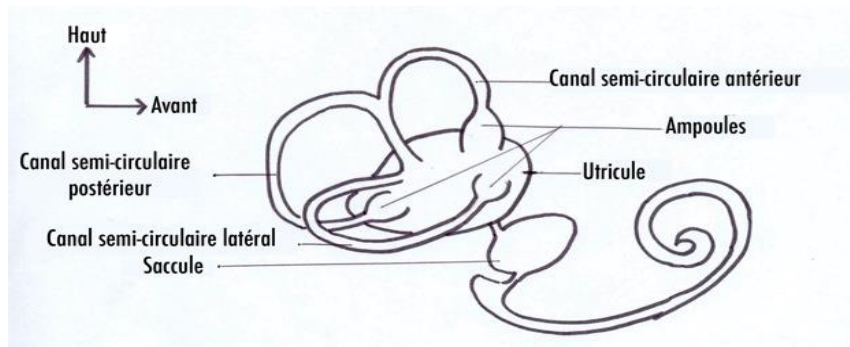


Figure 2.17 Le système vestibulaire (Collin & Pham Dang, s. d.)

Le vestibule, grâce à sa composition physiologique, aide à maintenir l'équilibre postural et contribue, en conjonction avec les informations visuelles et somesthésiques<sup>1</sup>, à la perception du mouvement propre et l'orientation (Dagonneau, 2012; Goldberg & Fernández, 2011). Lorsque la tête est en mouvement, des liquides visqueux (endolymphe) se déplacent à l'intérieur de l'oreille interne, ce qui permet d'avoir un retour permanent sur la position du corps et l'orientation dans l'espace sans interruption (Goldberg & Fernández, 2011).

Les trois types de mouvement d'une personne ou d'un objet sont illustrés dans la Figure 2.18 ci-dessous. Il s'agit d'un mouvement de lacet (yaw en anglais) lorsqu'il y a une rotation autour de l'axe Z, d'un mouvement de tangage (pitch en anglais) lorsqu'il y a une rotation autour de l'axe Y, et d'un mouvement de roulis (roll en anglais) lorsque la rotation se fait autour de l'axe X. Le mouvement du lacet possède une plus grande sensibilité de détection par rapport aux deux autres mouvements (Clark & Stewart, 1970; Meiry, 1965).

---

<sup>1</sup> Somesthésie : ensemble de sensations du corps : chaleur, froid, douleur, pression...



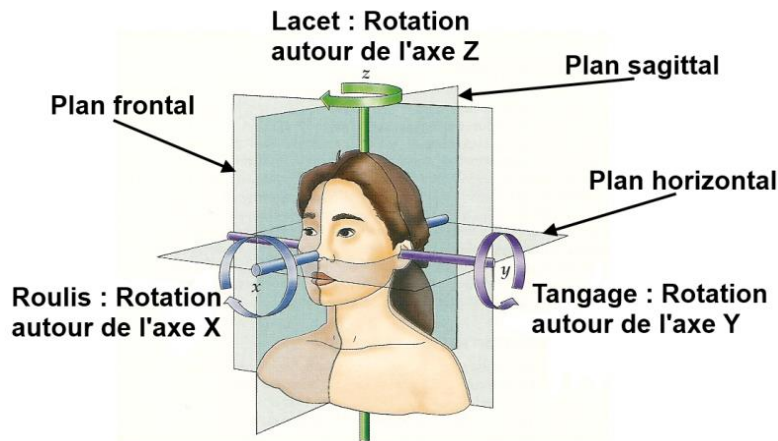
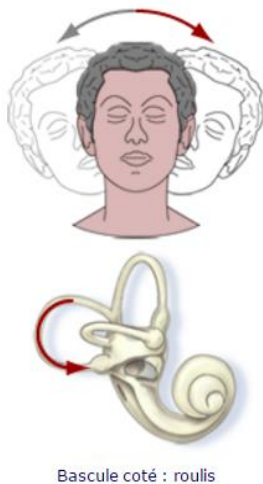
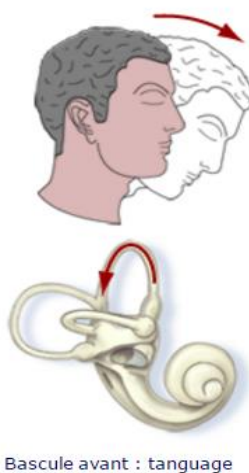


Figure 2.18 Plans et axes de rotation du corps humain (adaptation de (Purves & Williams, 2004) par (Dagonneau, 2012) )



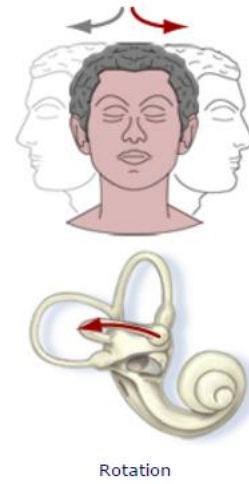
Bascule coté : roulis

Figure 2.19 Rôle du canal semi-circulaire vertical



Bascule avant : tanguage

Figure 2.20 Rôle du canal semi-circulaire antérieur



Rotation

Figure 2.21 Rôle du canal semi-circulaire horizontal

(Raymond, 2007)

## Le contrôle du mouvement

Lorsque le conducteur explore l'environnement autour de lui, une coordination de mouvement de tête accompagne la direction du regard et les saccades oculaires. Selon Hicheur (Hicheur, 2006) la locomotion humaine est basée sur des mécanismes de stabilisation de l'activité motrice et de l'orientation du corps vers la direction désirée. Ainsi le mouvement de la tête et des yeux est nécessaire pour la stabilisation et pour l'anticipation de la direction. Lorsque le trajet est déjà connu par le conducteur, il fait appel à sa mémoire spatiale qui se distingue par différents modèles : la mémoire kinesthésique (égocentriques), la mémoire épisodique et la mémoire cartographique (allocentrique). Pour mieux comprendre ces

mécanismes, se référer à l'article « Physiologie de la perception et de l'action » (Berthoz, 2008).

## 2. Comportement du conducteur et risque d'erreur

La conduite automobile est une tâche complexe où plusieurs composantes interagissent entre elles. Nous commençons par l'introduction des composantes principales de la conduite automobile, puis nous introduirons le comportement du conducteur à plusieurs niveaux, car cela nous permettra de mieux comprendre comment un système d'aide à la conduite peut agir pour soulager le conducteur dans certaines situations de dangers. Ensuite, nous abordons brièvement les facteurs humains pour mieux comprendre le fonctionnement des mécanismes d'attention, de saisie d'information, les risques et les causes de défaillances lors de la conduite automobile. L'aide visuelle à la conduite permet au conducteur de prendre conscience ou de se rappeler de certaines informations importantes pour la réalisation de la tâche de conduite principale en toute sécurité. Nous avons détaillé les nombreuses applications dans le chapitre 1. Il s'agit, par exemple d'un feedback visuel dès détection d'un élément pouvant entraîner une gêne, une confusion, une augmentation de la charge mentale, ou d'une assistance dans la saisie et l'interprétation d'informations par ordre d'importance... Avant de mettre en place ce type d'interface, il faut comprendre les besoins et les difficultés rencontrées par les conducteurs dans la phase d'analyse et les risques d'un basculement vers une situation critique ou déstabilisante pour le conducteur.

### 2.1. Les agents de la conduite automobile

Durant la conduite automobile, trois agents principaux interagissent dans un environnement dynamique qui évolue avec le temps : le conducteur, le véhicule, et l'environnement (cf. Figure 2.22). Dans la figure ci-dessous, un modèle de conduite au niveau 1 est représenté (implication d'un seul véhicule). Dans ce système d'interaction, le conducteur est un composant du système comme le véhicule et l'environnement mais il en est le régulateur principal. Ce modèle se complexifie avec l'augmentation des agents car cela augmente le nombre d'interactions possibles. C'est pourquoi plusieurs types d'erreur peuvent survenir et la défaillance pour résulter d'une ou plusieurs interaction entre les différents agents.

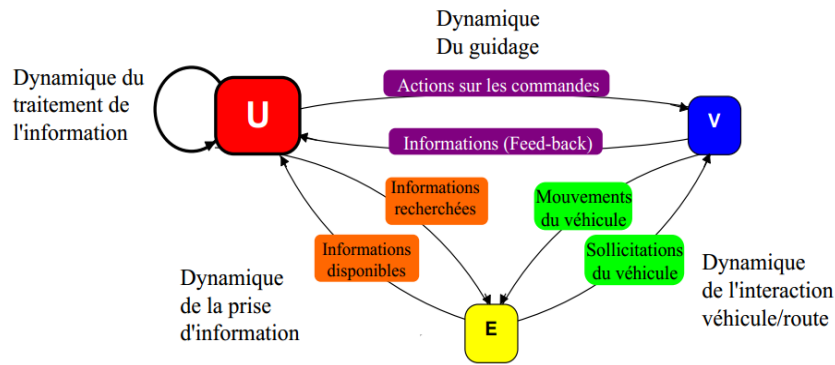


Figure 2.22 Interaction conducteur-véhicule-environnement (Perrin, Canu, Magnin, & Parraud, 2011)

## Le conducteur

Le conducteur peut être considéré comme le régulateur principal, car il entreprend des actions sur le véhicule en fonction des informations saisies dans son environnement. Ci-dessous, une schématisation simpliste du système véhicule-conducteur-environnement, proposée par Pierre Duysinx (Figure 2.23).

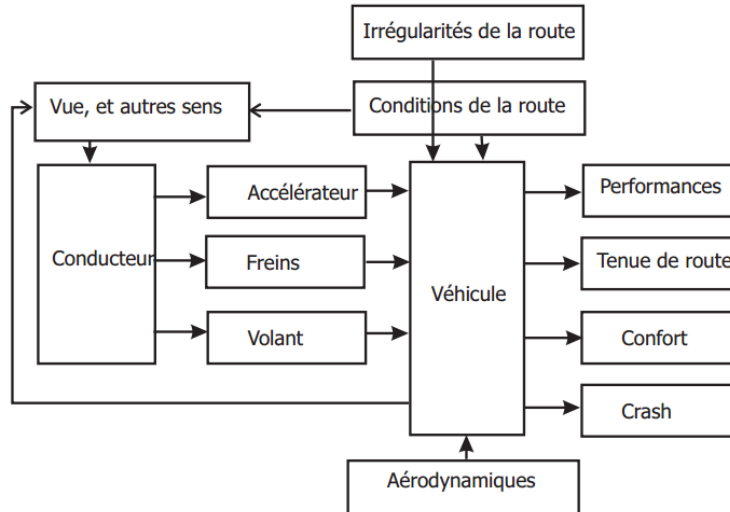


Figure 2.23 Système véhicule-conducteur-environnement à considérer pour l'étude du comportement, proposé par (Duysinx, 2010)

## Le véhicule

Le véhicule se distingue par ses spécificités techniques, mécaniques et physiques (par exemple : gabarit, poids, design, aérodynamisme...). Ces caractéristiques vont avoir une influence sur les performances du véhicule et la tenue de route. Le véhicule peut être doté

de systèmes intelligents permettant un meilleur contrôle du véhicule et/ou une délégation d'une partie de la tâche de conduite et de soulager le conducteur dans certaines situations. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, nous sommes actuellement dans une phase de forte convergence vers les véhicules semi-autonomes et des véhicules complètement autonome qui vont s'affranchir à termes de l'intervention humaine. L'introduction de ces véhicules sur la route va certainement influencer le comportement des autres usagers. Le déplacement du véhicule dans son environnement est régi par un repère défini par la norme SAE : x-longitudinal, y-latéral, z-vertical (cf. Figure 2.24).

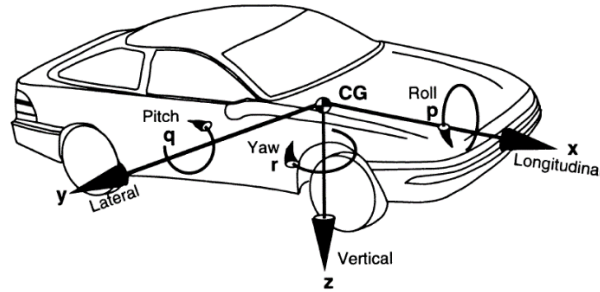


Figure 2.24 Repère véhicule selon la norme SAE(Duysinx, 2010)

## L'environnement

La composante environnementale englobe en réalité plusieurs autres entités dans le contexte de la conduite automobile. On peut citer la route qui est en contact direct avec le véhicule, car suivant son état et les conditions météorologiques, elle aura un impact différent sur la tenue de route du véhicule. Les informations présentes dans la scène de conduite peuvent avoir une influence sur le comportement du conducteur : régulation de la vitesse en fonction de la signalisation et des autres véhicules présents sur la route, modification de la trajectoire en fonction des obstacles...

### 2.2. La tâche de conduite

La tâche de conduite principale est une tâche sensori-motrice qui nécessite l'interprétation d'un flux important d'informations et d'entreprendre les actions physiques nécessaires pour guider la trajectoire latérale et longitudinale du véhicule, éviter des obstacles et naviguer jusqu'à l'arrivée à destination. La tâche de conduite est décrite comme une activité complexe, nécessitant une grande flexibilité du conducteur pour s'adapter en permanence à l'environnement de conduite (Neboit, 1982; Saad, 1975) et maîtriser le contrôle de la trajectoire du véhicule (M. Vernet et al., 2001). Comme le montre le schéma en Figure 2.25, plusieurs étapes se succèdent pour le bon déroulement de la tâche de conduite. Les informations recueillies sont généralement visuelle.

La première étape consiste à prélever les informations et les identifier avant de les traiter et de prendre des décisions. Puis, le conducteur exécute des actions en fonction, notamment, de son expérience et de la représentation fonctionnelle de ces informations par les conducteurs (M. Vernet et al., 2001).

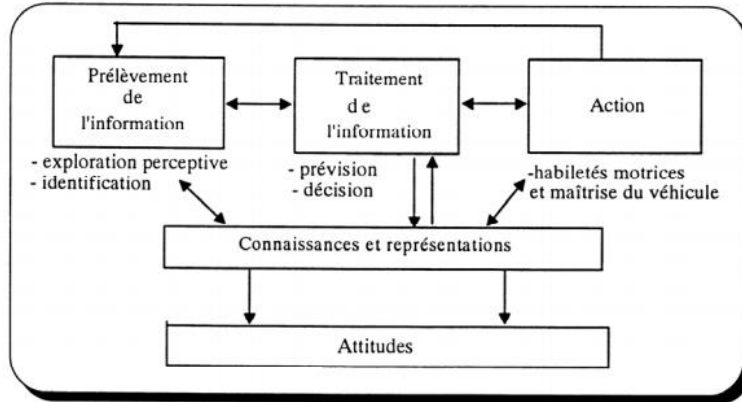


Figure 2.25. Les activités mises en jeu durant la conduite automobile (Neboit, 1979)

## 2.3. Le comportement du conducteur

### 2.3.1. Le modèle hiérarchique du comportement conducteur

L'un des modèles du comportement du conducteur les plus cités dans la littérature, est le modèle de Michon, 1985. Michon s'est inspiré de l'étude réalisé par Janssen en 1979 et propose une amélioration de son modèle. Il illustre le processus de prise de décision lors de la conduite automobile avec une organisation hiérarchique à trois niveaux, comme le montre la Figure 2.26 ci-dessous.

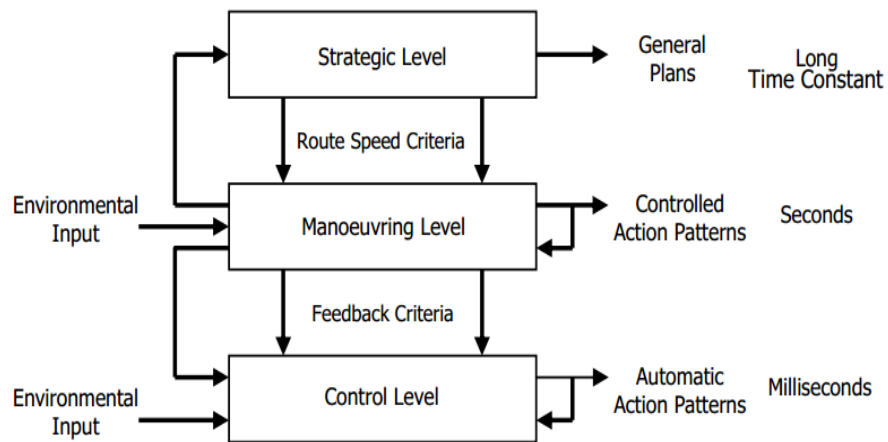


Figure 2.26 Modèle de comportement du conducteur selon Michon

## Niveau stratégique

Le conducteur se retrouve au niveau stratégique lorsque la tâche nécessite un effort cognitif important mais sans contrainte de temps, ce qui est le cas lors de la planification du trajet de la route en amont.

## Niveau tactique

Au niveau tactique, le conducteur doit prendre une décision rapidement en réaction à son environnement de conduite, comme l'adaptation de la vitesse au trafic. Le coût cognitif nécessaire est moins important qu'au niveau stratégique mais il est supérieur qu'au niveau opérationnel. En ce qui concerne la contrainte temporelle, elle est plus importante qu'au niveau stratégique, car la durée de la prise de décision est évaluée généralement en secondes, voir même en millisecondes.

## Niveau opérationnel

À ce niveau, les tâches sont exécutées d'une manière automatique par les conducteurs puisqu'ils font appel à des schémas déjà appris et enregistrés en mémoire. Par conséquent, l'effort cognitif que doit fournir le conducteur est très faible par rapport aux deux niveaux précédents.

### 2.3.2. Caractérisation des tâches de l'utilisateur

Jens Rasmussen a proposé en 1986 un modèle basé sur la caractérisation des capacités de l'utilisateur (Skill-Rule-Knowledge). Les tâches quasi-automatiques nécessitent des ressources cognitives rudimentaires, tandis que les tâches plus complexes requièrent l'appel à l'expérience de la personne ainsi qu'à sa capacité à gérer de nouvelles situations. Il distingue un comportement conscient et un comportement inconscient de l'utilisateur.

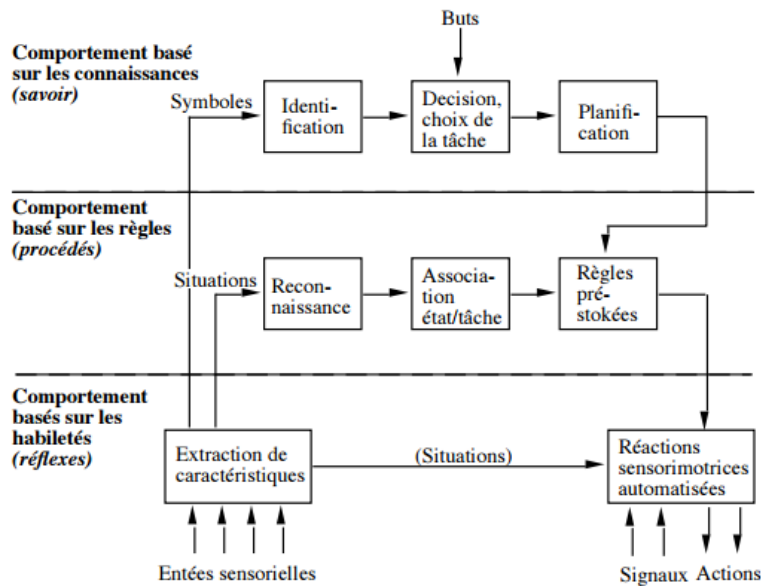
Le comportement conscient de l'utilisateur est :

- basé sur les connaissances : concerne les tâches qui nécessitent des ressources attentionnelles importantes car l'utilisateur ne s'est jamais confronté à cette situation qui ne correspond à aucune règle connue ;
- basé sur les règles : l'utilisateur fait appel aux règles déjà acquises.

Le comportement inconscient de l'utilisateur est :

- basé sur les répétitions : fait appel à un automatisme pendant l'exécution de la tâche.

La schématisation de ce modèle est présentée dans la Figure 2.27.



### Modèle simplifié des trois niveaux de contrôle des comportements humains

Rasmussen, Information processing and Human-Machine Interaction, an approach to cognitive engineering, Series, Vol. 12, North-Holland, 1986.

Figure 2.27 Modèle simplifié des 3 niveaux de contrôle des comportements humains (Nigay, 2002)

#### 2.3.3. Processus de prise de décision

En 1994, Ranney a proposé un modèle en fusionnant les deux modèles précédents (le Modèle de Michon, 1985 et celui de Rasmussen, 1986) pour expliquer le processus de prise de décision à plusieurs niveaux et l'automatisation des tâches en incluant les variations des contraintes temporelles et cognitives. Dans le tableau de Ranney (cf. Tableau 2.3), chaque niveau de tâche (du modèle de Michon) correspond à un niveau de capacité (du modèle de Rasmussen) : (1) les compétences de l'utilisateur vont lui servir au niveau opérationnel, (2) au niveau tactique l'utilisateur se base sur les règles apprises, (3) au niveau stratégique l'utilisateur se sert de ses connaissances. Cependant, plusieurs autres cas de figure peuvent se présenter, lors des situations de conduite peu familières par exemple, ou bien pour les conducteurs novices qui n'ont pas développé tous les mécanismes cognitifs pour optimiser leur tâche.

Tableau 2.3 Modèle de Ranney (Ranney, 1994)

		Temps →		
		Stratégique	Tactique/ Manœuvres	Opérationnel/ contrôle
Automatique ↓	Connaissances	Navigation dans une région inconnue	Contrôle dérapage	Première leçon d'un novice
	Règles	Choix des routes familières	Dépassement de véhicules	Conduite d'un véhicule non-familier
	Compétences/ Savoir-faire	Itinéraire utilisé quotidiennement	Négociation d'intersections familières	Maniabilité du véhicule dans les virages
		← Effort cognitif		

Nous retenons à partir des modèles présentés ci-dessus, que plus la situation est familière, plus elle devient automatique, et demande de moins en moins de ressources cognitives. Souvent, l'automatisation implique une prise de décision inconsciente de l'utilisateur jusqu'à la rencontre d'une situation inhabituelle (Wagenaar, 1992). Nous pouvons suggérer deux actions possibles sur le comportement du conducteur : (1) rendre la situation la plus familière possible pour activer un processus automatique, ce qui va impliquer une limitation des ressources cognitives pour la réalisation d'une tâche donnée, (2) introduire volontairement des composantes pour perturber le phénomène de la conduite automatique pour faire appel aux connaissances du conducteur (comme les systèmes d'alerte pour prévenir d'un danger).

### 3. Analyse du risque routier et minimisation des erreurs

Avec la croissance du nombre de véhicules motorisés sur la route, le conducteur est confronté à un niveau de risque qui varie en fonction de la complexité du trafic environnant, de la qualité de la route, mais aussi de son état physiologique et psychologique. Le conducteur adapte un compromis entre ces nombreux paramètres et le niveau de confort souhaité pour contrôler le risque perçu pendant la conduite afin d'éviter les erreurs.

Selon la théorie de l'homéostasie du risque (Wilde, 1998), le conducteur maintient ou prend un niveau de risque conforme à ses attentes en termes de gains potentiels et d'enjeux éventuels. Fuller propose en 2005 une théorie d'évitement de l'effort mental, qui indique que le conducteur cherche à réduire l'effort mental et l'utilisation des ressources cognitives (Fuller, 2005). La théorie de risque de Reason, 1990 (J. T. Reason, 1990) propose une classification des erreurs intentionnelles et ce qu'elles impliquent comme défaillances à niveaux différents.



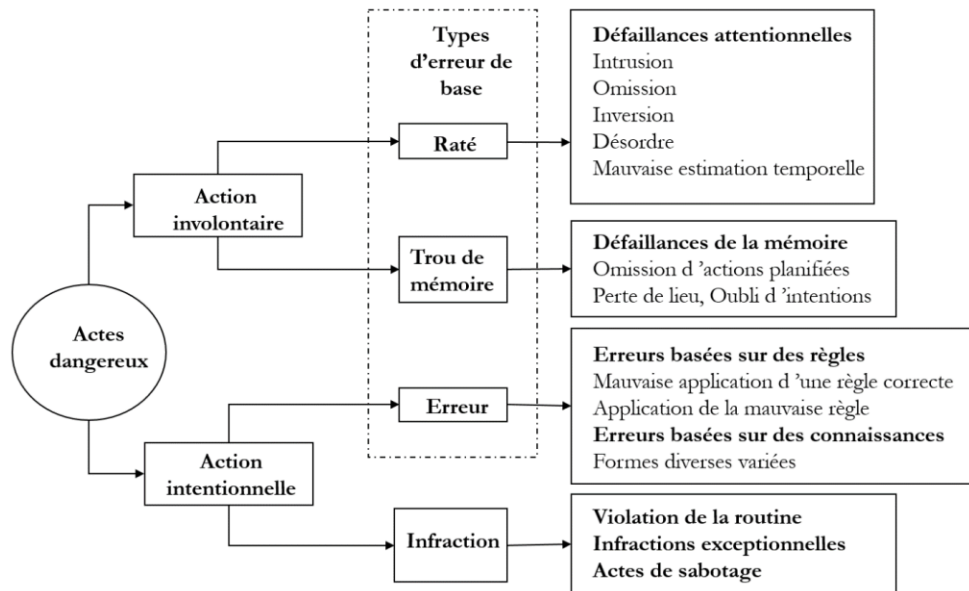


Figure 2.28. Classification des erreurs (J. Reason, 1995)

Dans le modèle ci-dessus (cf. Figure 2.28), James Reason présente les actes dangereux en deux catégories distinctes : les actions non volontaires et les actions intentionnelles. Les ratés et les trous de mémoire sont des erreurs inconscientes de l'exécution des actions routinières et automatisées. Elles sont souvent associées à la distraction. Les deux autres erreurs sont intentionnelles, et elles sont soit basées sur les règles (mauvaise application ou sélection de la mauvaise règle) ou sur les connaissances (connaissances limitées ou situations nouvelles). La violation est une action volontaire qui peut concerner la violation des actions routinières, les infractions exceptionnelles et les actes de sabotage (Larouzee, Guarnieri, & Besnard, 2014).

## 4. Principes ergonomiques des interfaces - conducteur

D'un point de vue ergonomique, l'interface doit répondre aux besoins du conducteur sans surcharge cognitive, et ses caractéristiques doivent respecter la physiologie perceptive de l'utilisateur et ne pas rentrer en conflit avec sa stratégie visuelle. Dans cette partie, nous allons d'abord aborder quelques notions sur la charge cognitive et les facteurs pouvant influencer sur la charge mentale du conducteur. Nous allons présenter quelques principes ergonomiques et orientés utilisateurs pour la conception et l'évaluation des IHM.

### 4.1. Interface conducteur et charge mentale

Durant la conduite, l'environnement dynamique requiert une adaptation par le conducteur pour saisir les informations les plus pertinentes rapidement et entreprendre les actions nécessaires. Chaque tâche nécessite un niveau d'attention et engage une charge mentale qui

s'ajoute à la charge cognitive totale du conducteur. La ressource cognitive est définie comme l'effort mental nécessaire pour accomplir une tâche donnée (D. A. Norman & Bobrow, 1975; Wickens & Hollands, 2000). Dans le schéma ci-dessous (Figure 2.29), nous pouvons voir les facteurs qui peuvent influencer sur cette charge mentale dans le cadre de la conduite automobile.

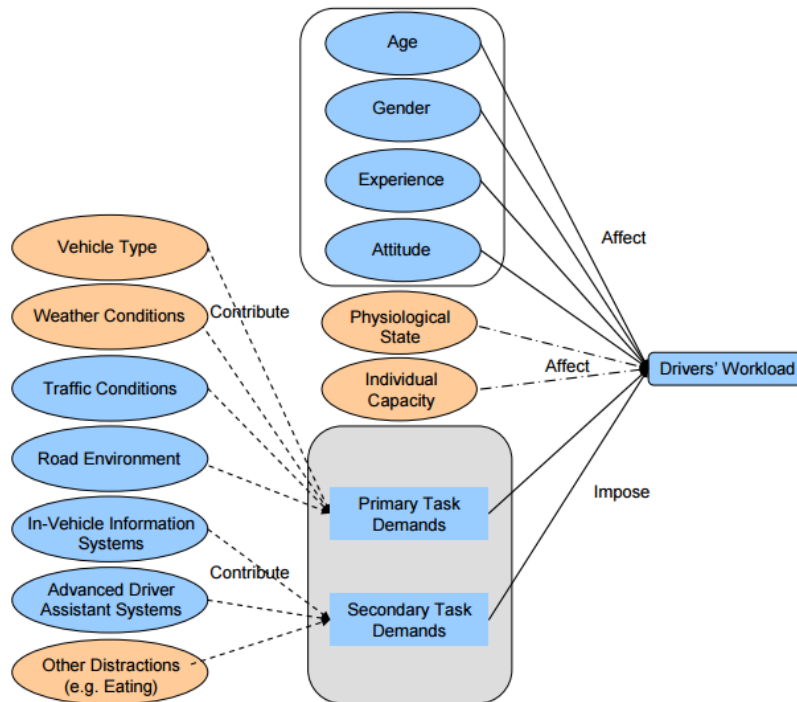


Figure 2.29 Les facteurs influant sur la charge mentale du conducteur (Yan Yang, 2011)

Nous pouvons voir que la charge mentale pendant la conduite est différente en fonction : des caractéristiques individuelles (âge, genre, expérience, attitude...), de l'état physiologique, des capacités individuelles, de la tâche de conduite principale ainsi que des tâches secondaires durant la conduite. La tâche de conduite principale concerne les actions associées directement au contrôle de la trajectoire du véhicule et l'évitement d'obstacle dans l'environnement dynamique de conduite. La tâche de conduite secondaire est une tâche qui peut interférer avec la tâche de conduite principale et qui contribue à l'augmentation de la charge mentale à cause de la parallélisation des deux tâches.

Lorsque la charge mentale augmente, la mémoire de travail sature et le conducteur adapte différentes stratégies pour faire un compromis entre la charge mentale, le niveau de risque et la performance de conduite. Des études dans la littérature montrent une relation entre la charge cognitive, le comportement du conducteur et les performances de conduite.

## 4.2. La théorie des ressources multiples

La théorie des ressources multiples a été introduite par Wickens 1987a. Elle met en évidence la combinaison de plusieurs ressources, et indique que lorsque deux tâches font appel à deux

ressources différentes, il n’y a pas de conflit de ressources. Selon Mulder 1986, il y a deux types d’efforts : effort liée à la tâche, et l’effort de traitement d’information. La charge mentale peut se mesurer à l’aide de différentes techniques : DALI : « Driving Activity Load Index », SWAT : « Subjective Workload Assessment Technique », WP : Workload Profile », SAS : « Simulation Adaptation Syndrome », et MRT : « Multiple Ressource Theory ».

### 4.3. Conception centrée sur l’utilisateur

La terminologie de la Conception Centrée Utilisateur - CCU (Used Centered Design -UCD en anglais) a été inventée par Norman en 1986. Elle est actuellement encadrée par les normes ISO 13407, ISO-9241 et ISO-9242. La norme ISO 13407, et concerne l’intégration ergonomique pendant tout le cycle de la conception en répondant aux besoins de l’utilisateur. L’utilisabilité de l’interface est définie par la norme ISO 9241 (1998) : degré d’utilisation d’une manière efficace et répondant aux objectifs et besoins de l’utilisateur dans un contexte donné. La norme ISO 9242 (2010) s’oriente quant à elle sur l’expérience de l’utilisateur en termes d’utilité, d’utilisabilité, la qualité d’usage, ainsi que la qualité hédonique<sup>2</sup>.

### 4.4. Applications des méthodes ergonomiques pour la conception d’un ATH-RA

La conception d’un ATH-RA fait appel à plusieurs connaissances dans différents domaines que nous résumons dans la figure ci-dessous (Figure 2.30).

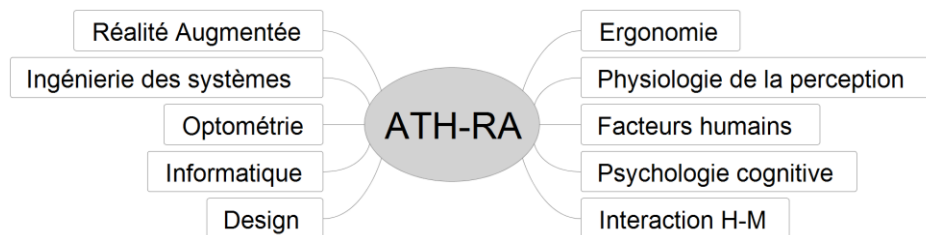


Figure 2.30 Domaines impliqués dans l’implémentation d’un ATH-RA

Plusieurs critères ergonomiques ont été définis dans la littérature. Nous citons à titre d’exemple, les huit critères de Bastien & Scapin (INRIA) :

- 1 - Compatibilité : transfert d’information rapide
- 2 - Homogénéité et cohérence : séquence de commande identique pour arriver au résultat
- 3 - Concision : réduction de la charge mnésique de l’utilisateur en limitant
- 4 - Flexibilité : prise en compte de la variation des utilisateurs
- 5 - Feed-back et guidage : retour immédiat après l’action pour une meilleure performance

---

<sup>2</sup> Hédonique : lié au plaisir

- 6 - Charge informationnelle : minimiser le nombre d'opérations et le temps de traitement
- 7 - Contrôle explicite : montrer que l'interface est sous contrôle de l'utilisateur
- 8 - Gestion des erreurs : fournir des moyens aisés pour la gestion des erreurs

## Conclusion

Dans ce chapitre, une description de la perception visuelle, auditive et vestibulaire a été fournie en définissant leurs caractéristiques fondamentales. Les organes perceptifs vus précédemment (système vestibulaire, système visuel et système proprioceptif) sont connectés entre eux. Nous avons vu que le système vestibulaire permet une localisation du corps dans l'espace ainsi que le maintien de l'équilibre. Mais cela se fait en adéquation avec les informations visuelles et proprioceptives récupérées. Nous avons également vu quelques modèles du comportement du conducteur et les risques associés à la conduite automobile. La phase d'apprentissage est très importante pour développer les bons schémas cognitifs et permettre l'automatisation de la tâche ainsi que limiter la demande des ressources cognitives dans la mesure du possible. L'utilisation d'une interface RA ne doit pas augmenter la charge cognitive mais doit être la plus intuitive possible pour permettre une prise en main facile par le conducteur. C'est ce qui nous a amené à présenter quelques principes ergonomiques appliqués aux Interfaces Homme-Machine (IHM) dans le cadre de la conduite automobile, ainsi que la normalisation ISO à ce sujet. Dans le chapitre suivant, nous allons nous focaliser sur les problèmes perceptuels éventuels lors de l'utilisation d'un ATH-RA par le conducteur, et plus particulièrement sur le phénomène de la Parallaxe de Mouvement Conducteur et les problèmes liés à la génération de ce mouvement.



# Chapitre 3 - Problèmes Perceptifs d'un ATH-RA et Importance de la PMC

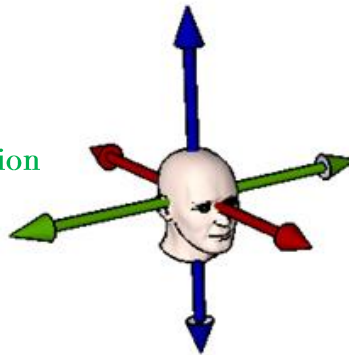
Nous avons vu dans les chapitres précédents le principe de fonctionnement d'un ATH-RA et l'importance de la prise en compte des facteurs humains lors de son utilisation comme un système ADAS visuel. Mais quels sont les problèmes perceptifs qu'un ATH-RA peut générer lors de son utilisation par le conducteur ? Et comment optimiser les paramètres de ce système ? Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons identifié trois paramètres majeurs pour la bonne perception des informations virtuelles et celles de la scène de conduite : (1) la Parallaxe de Mouvement du Conducteur – PMC, (2) la distance de projection de la RA, (3) et la condition de visibilité. Nous nous intéressons d'abord à la PMC, car nous pensons que son impact ne doit pas être négligé lors de l'utilisation d'un ATH-RA. C'est pourquoi, nous commençons par expliquer les causes et les problèmes qu'elle peut engendrer. Nous présentons ensuite nos facteurs expérimentaux, l'état de l'art associé ainsi que nos hypothèses de travail.

## 1. La Parallaxe Mouvement Conducteur - PMC

### 1.1. Définition de la PMC

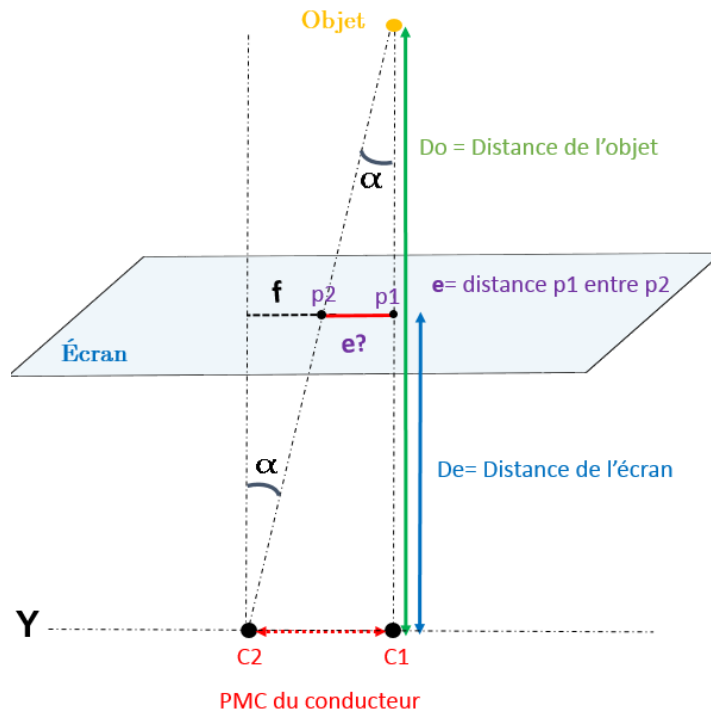
Ce que nous appellerons dans ce manuscrit « Parallaxe de Mouvement Conducteur-PMC » est en fait un mouvement de translation engendré par la tête du conducteur autour de la position centrale de conduite. Cet écart de position du conducteur est variable durant la conduite et il est plus au moins important en fonction des situations de conduite. Il est appelé ainsi car ce mouvement est à l'origine de l'effet parallaxe qui engendre une erreur sur la perception RA lorsqu'un ATH-RA est utilisé sans tenir compte de ce mouvement.

PMC Mouvement de translation  
Généré sur l'axe Y



## 1.2. Modèle géométrique de l'erreur générée sur un écran

Nous proposons une adaptation du modèle géométrique de (Andersson Hultgren, Blissing, & Jansson, 2012b) pour le calcul de l'effet de la parallaxe de mouvement (désigné par  $f$ ) et de l'erreur générée (désignée par  $e$ ) sur un écran de projection lorsque cet effet n'est pas corrigé.



$$\tan \alpha = \frac{f}{D_e} \quad \& \quad \tan \alpha = \frac{PMC}{D_o} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{f}{D_e} = \frac{PMC}{D_o} \quad \dots (1)$$

$$PMC = e + f \quad \Leftrightarrow \quad f = PMC - e \quad \dots (2)$$

On remplace la valeur de  $c$  dans (1) par (2) :

$$\frac{PMC - e}{D_e} = \frac{PMC}{D_o} \quad \Leftrightarrow \quad PMC \cdot D_o - e \cdot D_o = PMC \cdot D_e$$

$$e = PMC - \frac{PMC \cdot D_e}{D_o}$$

### 1.3. Problématique

Lorsque l'implémentation d'un ATH-RA prend seulement en compte la position centrale de conduite pour l'affichage des informations virtuelles. Le conducteur est contraint de rester dans cette même position pour voir correctement les informations affichées, sans quoi la perception de la RA est altérée. Ce conducteur peut restreindre ses mouvements de tête pour s'adapter à cette situation. Dans cette hypothèse, la limitation des mouvements est particulièrement gênante pour plusieurs raisons, on peut citer : le comportement de conduite n'est plus naturel, la stratégie de capture d'information est modifiée, et la vision périphérique de la scène de conduite est fortement réduite. En revanche, si l'utilisateur d'un ATH-RA (sans suivi de tête) n'adapte pas de position fixe pendant la conduite, même une légère modification de la position de la tête peut induire une perception erronée de l'information. Ce décalage perceptif peut varier en fonction de la distance focale de l'ATH-RA, et son impact peut dépendre de la condition de visibilité de la scène de conduite. De ce fait, l'utilisation ATH-RA peut amener le conducteur à être dans l'une des situations : (1) une adaptation à l'ATH-RA sans tracking en maintenant la tête la plus immobile possible, (2) génération d'une PMC et une perception visuelle altérée de la RA.

Dans cette thèse, nous nous intéressons en premier lieu à l'impact des mouvements de translation, qui est peu abordé en littérature dans le cadre de l'utilisation d'un ATH-RA pour l'aide visuelle à la conduite. Nous proposons, l'étude de l'impact de cette PMC sur la perception des informations du monde mixte, et l'implication sur les performances de conduite. Afin d'éviter de modifier la stratégie de conduite habituelle dans le cadre de l'utilisation d'un ATH-RA, la solution préconisée est de suivre les mouvements de tête du conducteur en mettant à jour les informations virtuelles en temps réel. Nous introduisons ensuite deux facteurs clés progressivement pour approfondir les études expérimentales : la distance de projection et la condition de visibilité. Ces paramètres impliquent des modifications majeures dans la perception des éléments RA et nécessitent une étude attentive afin d'extraire un ensemble de préconisations sur les réglages nécessaires d'un ATH-RA dans différents cas d'usage.

### 1.4. La génération des mouvements de tête

Plusieurs situations peuvent amener le conducteur à se déplacer autour de sa position centrale de conduite. Ces mouvements sont inévitables dans plusieurs situations comme les virages, les dépassements ou alors les situations de trafic dense. Les hypothèses qui seront



exposées ci-dessous, ont été établies en se basant sur les éléments de la littérature, pour expliquer pourquoi les mouvements de tête sont nécessaires et pourquoi on ne peut pas contraindre le conducteur à les limiter. L'objectif de cette partie est de fournir des éléments de l'état de l'art sur les causes de ces déplacements et l'utilité pour le conducteur en fournissant des éléments de littérature. Notre objectif n'est pas de redémontrer ces études, mais de comprendre certaines hypothèses expliquant l'importance des mouvements naturels du conducteur.

- **Changement de point de vue en réaction aux événements de la route**

Le point de vue du conducteur évolue dans un environnement dynamique, il doit donc réagir au trafic environnant et adapter son comportement et ses actions en permanence. Le conducteur peut modifier son point de vue volontairement ou inconsciemment dans plusieurs circonstances en fonction du trafic routier : lors d'un dépassement pour s'assurer qu'aucun véhicule ne se trouve dans l'angle mort, lors de l'occlusion d'un élément ou une partie de la scène pour avoir des informations manquantes, ou lorsque le trafic est dense pour avoir une meilleure vue sur l'environnement de conduite, et surtout si des véhicules plus imposants se trouvent à l'avant (Andersson Hultgren, Blissing, & Jansson, 2012a; Palmqvist, 2013).

- **Mouvement inconscient dû aux forces centripètes**

Cette deuxième hypothèse stipule que le mouvement induit par le conducteur, notamment dans les virages les plus serrés, est dû aux forces centripètes qui attirent le conducteur vers le centre du rayon de courbure afin de conserver une trajectoire circulaire (MacDougall & Moore, 2005). Cependant, plusieurs études ont remis en cause cette hypothèse dans le cadre de la conduite automobile.

- **Alignement avec certaines caractéristiques visuelles dans la scène de conduite**

Des études récentes sur simulateurs ont montré une génération systématique des mouvements de tête du conducteur même lors de l'absence des forces centripètes, comme c'est le cas dans les simulateurs de conduite. On parle dans plusieurs études, de l'alignement de la tête avec certaines caractéristiques visuelles dans la scène de conduite (Mestre & Authié, 2012; Zikovitz & Harris, 1999). Le but est alors d'optimiser les performances de conduite comme c'est le cas dans les virages avec la zone du point tangent. En effet, Land et Lee (M. F. Land & Lee, 1994) ont montré que les conducteurs regardent particulièrement le « point tangent » pendant la négociation du virage (cf. Figure 3.1), c'est le point immobile dans le flux optique (Hoc et al., 2006) qui caractérise un changement de direction de la bordure interne de la route. D'autres auteurs ont complété cette analyse sur le point tangent

et ont montré, par exemple, le rôle de la perception de cette zone pour le contrôle de la trajectoire latérale du véhicule.

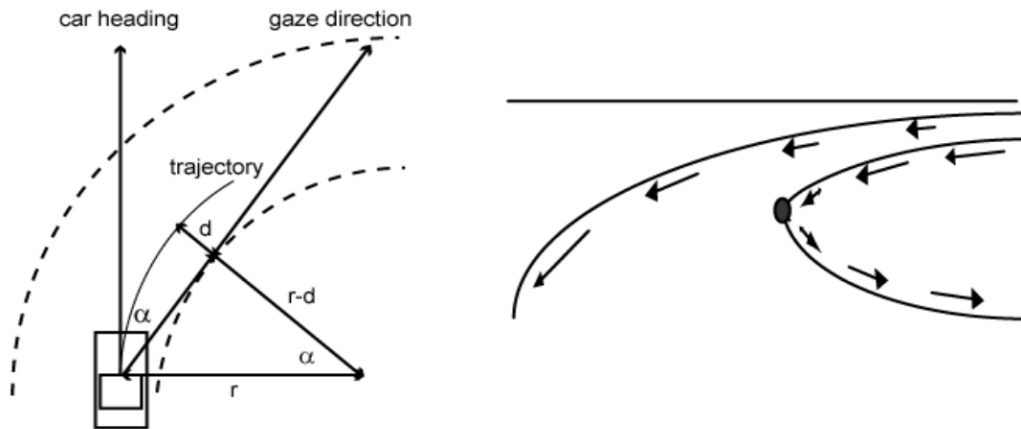


Figure 3.1 Le point tangent durant la négociation du virage (Hoc et al., 2006)

Dans l'étude de Land Michael et al. (Michael F. Land & Tatler, 2001) sur les pilotes de course, une relation a été établie entre la direction de la tête et le taux de rotation du véhicule une seconde plus tard. Dans l'hypothèse établie, ils proposent l'utilisation des caractéristiques visuelles de la courbure de la route non seulement pour contrôler l'angle du volant et la vitesse du véhicule mais aussi les mouvements de la tête. Lorsque le conducteur dirige sa tête vers un angle proportionnel à son estimation de la vitesse de rotation, la tête est par conséquent alignée avec cette zone des points tangents de la courbure de la route. Mestre et ses collaborateurs (Mestre & Authié, 2012) ont étudié l'amplitude des mouvements de tête du conducteur dans un simulateur de conduite statique, et les résultats ont confirmé l'hypothèse que les mouvements de tête font partie d'une stratégie d'anticipation visuelle globale. Ce qui fait que la tête est alignée avec quelques caractéristiques de la route.

- **Meilleure perception du mouvement et de la force gravito-inertielle par le système vestibulaire**

Cette hypothèse stipule que l'information de ce déplacement est utilisée par les récepteurs sensoriels du système vestibulaire, et s'ajoute à ses capacités à reconnaître les accélérations linéaires et angulaires, avec les inclinaisons de tête grâce aux organes otolithiques. Il est possible que le positionnement de la tête soit volontaire pour mieux prédire les accélérations couplées aux informations visuelles de la route, surtout avec l'expérience de l'utilisateur. Des réajustements posturaux peuvent avoir lieu pour maintenir l'équilibre mais aussi pour stabiliser le flux visuel. La particularité du système vestibulaire par rapport à la perception visuelle, est que l'information est continue dans l'espace, et il n'y a pas de discontinuités subites. Les informations vestibulaires et visuelles se retrouvent ainsi couplées pour améliorer

les performances de conduite, et corriger, par exemple, la trajectoire du véhicule plus facilement durant les virages (Dagonneau, 2012).

- **L'utilisation de la parallaxe de mouvement comme indice de profondeur pour une meilleure perception des distances**

La parallaxe de mouvement est un indice de profondeur utilisé en continu par les conducteurs pour l'estimation de la profondeur des objets proches et lointains. Ce mouvement du conducteur engendre un mouvement apparent sur la rétine de l'observateur. Ainsi, les images des objets proches se déplacent plus vite sur la rétine que les images des objets distants (Leroy, 2009). L'avantage de cet indice de profondeur, est qu'il est utilisé pour les courtes et longues distances (E. J. Gibson et al., 1959). Bien que l'efficacité de la parallaxe de mouvement pour l'estimation de la profondeur décroît avec l'accroissement d'observation (Ono & Ujike, 2005). La parallaxe de mouvement est nécessaire pour la perception de la localisation dans l'espace et l'estimation de la profondeur des différents objets statiques et dynamiques dans la scène de conduite (comme les véhicules, les obstacles ou les panneaux de signalisation...). Nawrot dans « Depth from motion parallax scales with eye movement gain » a étudié la façon avec laquelle la perception de profondeur avec la parallaxe de mouvement évolue avec le mouvement des yeux (Nawrot, 2003). Aytekin Murat et ses collaborateurs (Aytekin & Rucci, 2012), ont étudié l'indice de la parallaxe de mouvement avec la génération des mouvements microscopiques. Ils indiquent par exemple, que beaucoup de mouvements sont involontaires sous certaines conditions de visibilité, avec un décalage visuel dans l'espace. Par ailleurs, les images ne sont jamais stationnaires sur la rétine car de petites fluctuations sont présentes, même lorsque la direction du regard est maintenue sur un point dans l'espace. Cette indication est encore plus évidente dans un environnement de conduite, car le conducteur est transporté avec la vitesse de son véhicule. Lorsque le conducteur regarde l'horizon, il aperçoit sur sa vision périphérique des objets défilent rapidement autour de lui et attirent inconsciemment son attention. Même lorsque le conducteur ne change pas la direction de son regard, des micro-saccades involontaires sont présentes pour renforcer sa localisation dans l'espace.

### **1.5. Synthèse sur la génération des mouvements de tête par le conducteur**

Nous venons de voir que plusieurs raisons peuvent causer le déplacement de la tête pendant la conduite. Quelle que soit la motivation pour la génération de ce mouvement, le but est d'avoir accès à des informations supplémentaires, pour permettre au conducteur d'entreprendre les actions nécessaires et au bon moment, afin de mieux contrôler et anticiper la trajectoire du véhicule. De ce fait, nous n'avons pas intérêt à perturber le comportement

postural naturel du conducteur. Cette thématique de recherche n'a pas pour objectif de déterminer d'une manière exacte les causes de ce mouvement dans chacune des circonstances de conduite automobile. Nous nous intéressons plutôt à l'impact de la PMC lorsqu'un ATH-RA est utilisé pour l'aide visuelle à la conduite. Comme nous l'avons vu précédemment, deux cas peuvent se présenter lors de l'utilisation d'un ATH-RA : (1) l'adaptation du conducteur à l'ATH-RA (sans correction de la PMC) en maintenant la tête la plus immobile possible, et nous avons vu que cela peut perturber la stratégie du conducteur car il risque de perdre des informations pertinentes ; (2) la perception d'altération visuelle plus au moins importante en fonction de l'ampleur des mouvements. Avant d'exposer plus en détail les facteurs étudiés (section 3), nous proposons une revue des altérations visuelles identifiées si la PMC est négligée lors de l'utilisation d'ATH-RA.

## **2. Problèmes liés à la PMC**

Nous présentons dans ci-dessous quelques gênes inhabituelles qui peuvent apparaître lors de l'utilisation d'un ATH-RA pour l'aide visuelle à la conduite si la PMC n'est pas prise en compte pour la présentation des informations virtuelles au conducteur.

### **2.1. Altérations visuelles identifiées**

- **Problème de recalage entre le réel et le virtuel**

Le recalage entre le réel et le virtuel est un paramètre important pour une application en réalité augmentée. En effet, Ronald Azuma intègre ce paramètre comme l'une des caractéristiques fondamentales de la Réalité Augmentée.

Lors de l'utilisation d'un ATH-RA, ce recalage n'est pas précis si la PMC n'est pas prise en compte, car des problèmes d'alignement peuvent être générés avec le mouvement du conducteur autour de sa position centrale de conduite. Ce qui, par conséquence, peut engendrer d'autres gênes, notamment, l'occultation d'autres informations importantes dans l'environnement de conduite, une mauvaise interprétation de l'information virtuelle (exemple sur l'information trajectoire du véhicule, indication GPS...), un inconfort visuel...

- **Modification de la stratégie visuelle habituelle**

Le conducteur adapte une stratégie apprise et acquise avec l'expérience pour la capture d'informations visuelles. La stratégie de capture d'information peut être modifiée avec la saillance de la RA. La Réalité Augmentée peut ainsi aider à détecter plus rapidement les informations les plus importantes dans des situations critiques. Cependant, si les informations virtuelles sont mal recalées avec l'environnement réel, cette saillance visuelle risque d'être gênante pour le conducteur et l'incitera peut être à ignorer l'information. Si le

conducteur adapte une position de tête la plus immobile possible, la stratégie de capture d'information habituelle se voit modifiée, ce qui risque de compromettre sa performance par conséquence.

- **Imprécision des informations et mauvaise interprétation par le conducteur**

Lorsque les informations virtuelles sont éloignées visuellement des objets réels correspondants, cela peut engendrer une confusion de l'utilisateur. Un problème d'association entre l'objet réel et la métaphore correspondante peut être causé.

- **Occultation d'autres éléments pertinents dans la scène de conduite**

Si les informations virtuelles ne sont pas présentées au bon endroit, cela peut avoir comme effet d'occulter d'autres éléments importants dans la scène de conduite.

- **Génération d'un inconfort visuel**

L'utilisateur peut être gêné par l'imprécision de l'alignement réel-virtuel, ce qui peut causer : une sensation d'images doubles, une difficulté à faire une mise au point, une difficulté à alterner son regard entre l'information réelle et virtuelle. Si l'interface se caractérise par une importante modification de certains aspects physiologiques, cela risque de dégrader sa vue momentanément. Dans le cas d'un ATH-RA, l'enjeu sur la sécurité routière est primordial, même une fatigue visuelle banale n'ayant pas vraiment d'impact sur la santé de la personne peut causer des dégâts d'une grande ampleur sur une route. C'est pour cela, au-delà des caractéristiques physiologiques du conducteur et ses grandes capacités d'accoutumance, il faudrait cerner les limites acceptables par les conducteurs.

- **Estimation de la profondeur des objets**

La parallaxe de mouvement est considérée comme l'un des indices monoculaires les plus efficaces pour l'estimation de la profondeur. De plus, les images récupérées par la rétine sont couplées aux informations vestibulaires pour l'interprétation des données de la scène de conduite. Si le conducteur adapte une position de tête la plus stable possible et restreint ses mouvements, cela peut avoir comme effet de perturber l'utilisation instinctive de cet indice et de manquer d'informations importantes. Par conséquent, une altération de la perception naturelle du conducteur avec la parallaxe de mouvement peut engendrer une altération de la perception de la profondeur, avec une détérioration de la perception des distances egocentrique et exocentriques.

## **2.2. Autres problèmes identifiées et conséquences**

- **Limites techniques relatives à la taille de l'ATH-RA**

Les interfaces ATH-RA de première génération possèdent une taille d'affichage limitée pour l'affichage des informations RA. La non-correction d'erreur engendrée par la PMC peut amener l'information à se situer en dehors de la boîte à œil (RA eyebox), ou alors provoquer une fluctuation des informations au bord de l'affichage.

- **Altérations comportementales**

Le conducteur a acquis des réflexes comportementaux pour être confortable et efficace. Il adopte notamment une certaine posture physique et exécute sa tâche avec les réflexes habituels. La posture physique est adaptée pour avoir un champ visuel optimal, et les mouvements du conducteur sont motivés par les informations présentes dans l'environnement de conduite. Lorsque des altérations comportementales sont présentes, des confusions et des gênes peuvent se présenter au conducteur. Si l'affichage RA n'est pas adapté à la position du conducteur, cela risque de compromettre le comportement naturel du conducteur ainsi que sa stratégie de perception visuelle.

- **Problème d'adaptation**

Plusieurs paramètres peuvent contribuer à l'adaptation à un ATH-RA, notamment, l'intuitivité de l'ATH-RA et les efforts réalisés pour se rapprocher de la vision naturelle. L'être humain est capable de s'adapter à certaines contraintes en faisant coupler les informations physiologiques, les indices de perceptions visuelles et les interprétations acceptées par le cerveau. Cette technique d'adaptation est utilisée d'une manière inconsciente jusqu'à une certaine limite. Cependant, un problème d'adaptation peut se manifester, surtout lorsque le nouveau système ne correspond pas aux attentes du conducteur en termes de réglages, où lorsqu'il nécessite une modification importante dans le comportement de l'utilisateur.

- **Dégradation de la performance de conduite**

L'un des objectifs d'un système d'aide à la conduite est d'améliorer les performances de conduite. L'effet inverse peut se produire si le système génère des gênes qui perturbent la stratégie visuelle du conducteur ou son comportement habituel.

- **Augmentation de la charge mentale**

Seulement les informations pertinentes devraient être affichées au moment où le conducteur en a besoin pour éviter une surcharge cognitive. De plus, si l'information affichée ne peut pas être interprétée facilement par le conducteur (à cause d'une confusion générée par un alignement non adéquat par exemple), cela risque de faire appel à plus de ressources cognitives et surcharger ainsi la mémoire de travail du conducteur.

### 3. Facteurs expérimentaux et hypothèses de travail

Le choix des paramètres expérimentaux s'est fait progressivement avec l'étude de l'état de l'art. Nous nous sommes d'abord intéressés au phénomène de la PMC. Par ce fait, nous avons voulu vérifier la génération de cette PMC, ainsi qu'à son impact sur la perception du conducteur lors de l'utilisation d'un ATH-RA. Puis nous avons voulu affiner notre étude en nous intéressant à deux paramètres importants : la distance de projection de la RA et la condition de visibilité, puisque ils peuvent avoir un impact majeur sur la perception visuelle du conducteur, et leurs variations risquent de modifier considérablement l'impact de la PMC. Nous présentons dans les paragraphes ci-dessous, les questions scientifiques, puis quelques éléments de l'état de l'art associés aux facteurs expérimentaux, et nous présenterons enfin nos hypothèses dans la partie suivante.

#### 3.1. Les questions scientifiques

Les questions scientifiques principales qui sont traitées dans cette thèse sont les suivantes :

- Faut-il prendre en compte la PMC lors de l'utilisation d'un ATH-RA ?
  - Quel est l'impact de la PMC sur la perception de la réalité mixte ?
  - Quel est l'impact de la PMC sur le comportement du conducteur et ses performances de conduite ?
- Quelle est la distance de projection adéquate pour un ATH-RA ?
  - Comment varie la PMC en fonction de la distance de projection ?
- Faut-il adapter les mêmes paramètres en visibilité réduite et en visibilité normale ?
  - Quel est l'impact de la PMC en visibilité réduite ?
  - Quelle distance de projection est adéquate en visibilité réduite ?

#### 3.2. La PMC

Le conducteur adopte une position centrale de conduite qui ne peut pas rester fixe dans toutes les circonstances pour plusieurs raisons (cf. 1.4). En effet, des mouvements sont générés durant la conduite, il s'agit de mouvements du conducteur autour de la position initiale de conduite. Lors de l'utilisation de d'un ATH-RA cette PMC est gênante si l'affichage n'adapte la diffusion des informations virtuelles en fonction de la position du conducteur, et provoque notamment un problème d'alignement entre l'environnement virtuel et l'environnement réel. Ce facteur d'alignement entre le réel et le virtuel a été annoncé comme un facteur important de performance dans l'article publié par Paul Milgram et David Drascic en 1997 : « Perceptual effects in aligning virtual and real objects in augmented reality displays », notamment pour les applications de la chirurgie assistée par ordinateur (Milgram & Drascic, 1997). Rappelons également que dans la définition des

caractéristiques de la RA par Ronald Azuma en 1997 (cf. Chapitre 1 .1.1 ), l'auteur précise qu'une coexistence entre l'environnement réel et virtuel est nécessaire avec un alignement adéquat.

Dans un contexte de conduite automobile, l'étude réalisée par (Charissis & Naef, 2007) montre la nécessité de calibrer et d'aligner les informations virtuelles avec l'environnement réel lors de l'utilisation d'un ATH pour l'aide à la conduite, surtout lorsque le système est utilisé par différents usagers (calibration d'un ATH pour des conducteurs de différentes tailles cf. Figure 3.2). Ces mêmes auteurs proposent un prototype de calibration virtuel pour régler l'affichage en fonction de la taille du conducteur et de sa position de conduite. Dans cette étude, ils constatent que même une petite erreur de calibration de l'ATH peut induire un décalage d'alignement important et générer ainsi des problèmes sur la perception des conducteurs (cf. Figure 3.3).



Figure 3.2 Étude d'un prototype de calibration d'un ATH (Charissis & Naef, 2007)



Figure 3.3 Effet visuel d'une erreur de calibration offset de 2cm (Charissis & Naef, 2007)

Shahid et ses collaborateurs (Shahid, Nawaz, & Habib, 2013) ont proposé quant à eux un système ADAS visuel, qui permet d'afficher des informations RA pour assister le conducteur dans le contrôle de la trajectoire longitudinale du véhicule. Ils considèrent dans leur étude que le conducteur ne peut pas maintenir en permanence une position fixe de conduite, puisque plusieurs situations peuvent amener le conducteur à modifier le déplacement de la tête, par exemple : la visualisation des objets et des événements sur la route, la manipulation d'une interface ou d'un objet dans le véhicule, ou alors lorsque le conducteur mène une conversation avec un passager. Cela provoque un changement de perspective pendant la



conduite, ce qui a amené ces auteurs à prendre en compte ce comportement lors de la conception d'une interface RA pour l'aide avancée à la conduite automobile. Ils ont par conséquent proposé un système qui permet, entre autres, de projeter la trajectoire estimée du véhicule (si les paramètres de l'angle au volant et la vitesse restent constants) en fonction de la position du conducteur en temps réel (cf. Figure 3.4).

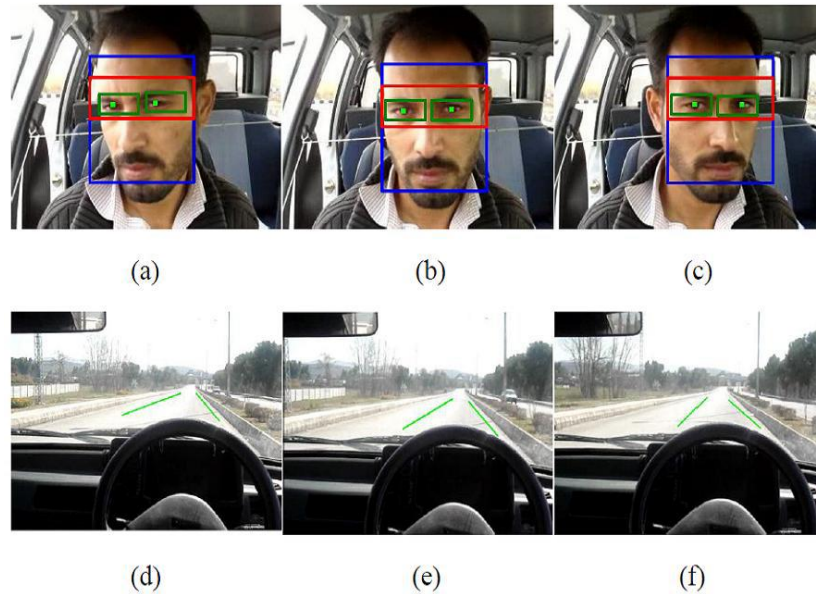


Figure 3.4 Projection temps réel en fonction de la position de la tête et de la direction du regard (Shahid et al., 2013)

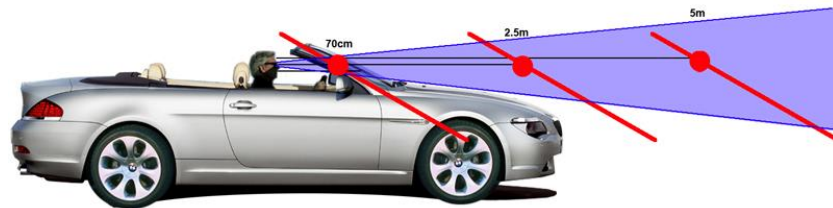
### 3.3. La distance de projection

Comme indiqué précédemment (cf. Chapitre 1 .2.1) l'ATH-RA est une technologie qui existe depuis plusieurs années dans le domaine de l'aéronautique. Plusieurs études menées dans ce domaine indiquent un besoin de projeter les informations virtuelles à une distance qui correspond approximativement à l'infini optique. Lors du pilotage d'un avion, l'œil est la plupart du temps focalisé à l'infini optique c'est pourquoi le fait de projeter les informations virtuelles à quelques mètres devant le pilote permettrait de faciliter le mécanisme d'accommodation. Dans le domaine de l'automobile, l'environnement externe de conduite est beaucoup plus dense en termes de nombre d'informations et d'obstacles à proximité. On retrouve ainsi une forte variation de la distance égocentrique pour les différents objets environnants. Plusieurs études concernant la distance focale de projection ont révélé des résultats contradictoires, sans doute à cause des différences entre les conditions expérimentales et les différences interindividuelles entre les sujets (âge, acuité visuelle et stéréoscopique...). Nous citons de manière non exhaustive quelques exemples avec les hypothèses établies.

Deux études dans la littérature (Inuzuka, Osumi, & Shinkai, 1991; Hiroshi Kato, Ito, Shima, Imaizumi, & Shibata, 1992) indiquent que la distance focale optimale pour les personnes âgées est une distance relativement proche âges (environ 2m), d'après une étude réalisée avec des personnes de différents âges (résumées dans: Herbert Yoo, Watanabe, Green, & Shah, 1999).

Gish et ses collaborateurs recommandent de projeter l'ATH-RA entre 2.5 m et 4 m afin de convenir à la majorité des conducteurs, et plus particulièrement pour les conducteurs âgés (Gish & Staplin, 1995). Selon Tufano (Tufano, 1997), l'utilisation d'une distance focale trop proche peut causer : le dédoublement d'images, une surestimation des distances, et peut avoir une influence sur la détection de la distance et la taille des objets environnants. Si la projection de l'image virtuelle se fait à l'infini, le conducteur fait sa mise au point à l'infini, et par conséquent les objets dans le champ visuel proche nécessitent un temps de détection plus long ou risquent d'être ignorés complètement (Herbert Yoo et al., 1999).

Dans l'étude effectuée par Charissis et ses collaborateurs (Charissis & Naef, 2007), différentes distances de projection ont été testées (70 cm, 2.5 m, et 5 m) avec une Affichage Tête Haute sur une pare-brise (full-windshield HUD cf. Figure 3.5 ).



*Figure 3.5 Illustration des différentes distances de projection de l'ATH-RA  
(Charissis & Naef, 2007)*

La capacité de focalisation des conducteurs a été analysée ainsi que les comportements associés à chaque distance de projection durant des conditions de bonne visibilité et des conditions de visibilité réduite (8 conditions expérimentales au total ont été testées). Voici quelques conclusions importantes qui ont été formalisées suite à cette étude :

- Un meilleur confort visuel pour la distance de projection à 5 m dans tous les cas et par conséquent une préférence pour cette distance focale par les sujets. Cependant, il a été constaté que ce résultat est moins prononcé en visibilité réduite. Ce résultat a été expliqué par les auteurs, par une forte réduction d'indices visuels en visibilité réduite, c'est pourquoi les conducteurs utilisent principalement l'information RA de l'ATH pour détecter les véhicules environnants.
- Durant les conditions de bonne visibilité, les conducteurs ont manifesté un problème de distraction et ont préféré conduire sans l'ATH.

### 3.4. Les conditions de visibilité

Un système d'aide à la conduite avancée trouve surtout son utilité dans une conduite de nuit ou en condition de visibilité réduite. Les capacités techniques d'un système ATH-RA peuvent permettre de fournir des informations aux conducteurs en toute sécurité et veiller à ce que le véhicule reste bien sur sa voie (Heon et al., 1999). Selon Marc Green, le taux de mortalité des piétons est trois fois plus élevé la nuit qu'en journée, et la raison serait la faible luminosité due à un éclairage ambiant réduit (M. Green, 2008). Plusieurs études ont relevé une association entre la myopie nocturne et les accidents de nuit (Cohen et al., 2007; Knoll, 1952; O. W. Richards, 1967; Oscar W. Richards, 1978). L'étude réalisée par Yuval Cohen et ses collaborateurs montre que le changement dans la réfraction par une myopie nocturne était corrélé avec le nombre d'accidents de véhicules, cependant les sujets ne sont pas totalement conscients de la dégradation des performances visuelles. En effet, l'œil présente une myopie nocturne à cause de la réduction du niveau de luminosité, ce qui dégrade la vision focale (vision utilisée pour la détection et la reconnaissance des objets) et rapproche la distance de mise au point (M. Green, 2008).

Fors et ses collaborateurs indiquent que la circulation de nuit implique plusieurs difficultés liées à la perception de la route, la détection d'obstacles et l'estimation des distances. Les technologies devront être adaptées en fonction des différents utilisateurs pour faciliter la perception des informations dans la scène de conduite (Fors et al., 2009).

L'étude réalisée par Charissis et ses collaborateurs montrent que les conducteurs utilisent exclusivement l'ATH-RA lorsque la condition de visibilité est réduite pour extraire les informations importantes de la scène de conduite et guider le véhicule (Charissis & Naef, 2007).

Selon plusieurs études dans la littérature, en condition de faible éclairage la composante accommodative de l'œil se voit modifiée. On parle ainsi du rapprochement du point d'accommodation « myopie nocturne », de phénomène de myopisation accommodative ou alors de « empty-field myopia ». En visibilité réduite l'amplitude de l'accommodation se situe entre le « dark focus » (le dark focus est le point de repos de l'accommodation lorsqu'aucun stimulus n'est présent) et la distance du stimulus.

### 3.5. Hypothèses principales

La problématique principale de cette thèse concerne l'impact de la génération de déplacements par conducteur lors de l'utilisation d'un Affichage Tête Haute – Réalité Augmentée (ATH-RA) pour l'aide visuelle à la conduite automobile. L'hypothèse principale stipule que la prise en compte de ces mouvements du conducteur est nécessaire pour agir comme un système d'aide à la conduite et garantir la bonne perception du monde mixte

(RA superposée sur la scène réelle de conduite). En effet, des préconisations sur les paramètres visuels sont nécessaires pour éviter de générer des problèmes perceptuels avec ce type d'interfaces, et avoir un impact négatif sur les performances de conduite.

Les hypothèses sur les facteurs étudiés sont présentées ci-après, et elles seront reprises ultérieurement dans la présentation des expérimentations.

### **Hypothèses sur la PMC**

- Le conducteur génère une PMC
- Si la PMC est générée, la perception de l'ATH-RA sans suivi de tête sera altérée
- La PMC lors de l'utilisation d'un ATH-RA aura un effet sur la perception de l'environnement mixte et va impacter la perception de la précision de l'alignement des informations réelles et virtuelles

### **Hypothèses sur la distance de projection**

- La distance de projection de l'ATH-RA aura un effet sur l'impact de la PMC
- La distance de projection aura un impact sur la perception de l'environnement mixte et sur la précision de l'alignement des informations R/V en profondeur

### **Hypothèses sur la condition de visibilité**

- La condition de visibilité aura un effet sur l'impact de la PMC (l'impact de la PMC sera différent en fonction de la condition de visibilité)
- La condition de visibilité aura un effet sur la perception de l'environnement mixte et sur la perception de la précision de l'alignement des informations R/V
- La distance de projection devrait être adaptée en fonction de la condition de visibilité

## **Conclusion**

Selon des études antérieures, les informations virtuelles doivent être correctement positionnées et alignées aux éléments réels. C'est d'autant plus vrai dans un environnement de conduite, car les problèmes perceptuels peuvent avoir des enjeux sécuritaires conséquents. Dans cette partie, nous avons introduit la problématique traitée dans cette thèse et expliqué nos motivations, puis nous avons dressé un ensemble de verrous et d'altérations visuelles qui peuvent survenir lors de l'utilisation d'un ATH-RA. Enfin nous avons exposé les trois facteurs qui seront considérés dans la partie expérimentale et nous avons présenté nos hypothèses de travail. Avant de présenter les expérimentations réalisées, nous exposons dans le chapitre suivant les moyens expérimentaux, la méthodologie expérimentale ainsi que les critères d'évaluation.



# Chapitre 4 – Méthodologie Expérimentale

La simulation de conduite nous permet de tester des systèmes innovants en gardant le conducteur dans la boucle de conception et de validation (Driver In the Loop - DIL). Outre les nombreux avantages qu'offrent les environnements immersifs de type CAVE et les simulateurs de conduite, notamment le fait de faire des tests réalistes sans mettre en péril le conducteur, ces moyens offrent aussi la possibilité de tester des prototypes de systèmes innovants à moindre coût. L'ATH-RA a fait l'objet d'une simulation stéréoscopique virtuelle, et a été directement intégré dans la scène de conduite par le biais du logiciel de simulation, puis nous avons mené des tests dans des simulateurs de conduite avec de vrais conducteurs. L'objectif de ce chapitre est de présenter notre environnement technique, les moyens expérimentaux, la méthodologie expérimentale et enfin les critères d'évaluation des résultats.

## 1. Simulation de conduite et environnement virtuel

### 1.1. Plateforme d'Intégration Interactive P2I

La Plateforme d'Intégration Immersive P2I de Renault est un simulateur de type CAVE (Cave Automatic Virtual Environment- en anglais), avec 4 surfaces de projection (3m x 2.5m), et une résolution de 1024 x 768 par face. Il permet une vision stéréoscopique de la scène de conduite, la visualisation du cockpit de véhicule, et l'ATH-RA en fonction de la position de conducteur. Pour les besoins expérimentaux, un simulateur statique est placé au milieu de ce P2I-CAVE, comme le montre la Figure 4.1 ci-dessous.



Figure 4.1. Plateforme d'Intégration Immersive P2I

### 1.2. Simulateur CCARDs

Le simulateur de conduite dynamique CARDS 3D est composé de 4 faces de projection type CAVE 3D, avec des projecteurs possédant une résolution de 1200 x 1920 avec une fréquence de 120Hz mono/ 60Hz en stéréo, un champ de vision en horizontal = +30/-40°, un champ de vision en vertical = 170/-100°, une distance conducteur - écran central de 2.2m, et une distance conducteur - écrans latéraux de 2m (cf. Figure 4.2).



Figure 4.2 Simulateur de conduite CCARDs Renault

### 1.3. Logiciel de simulation SCANeR

La plateforme SCANeR™ Studio a été utilisée pour faire fonctionner tous les modules nécessaires dans le cadre de notre expérimentation. Le module visuel a été enrichi avec un plugin RA complémentaire afin de visualiser en 3D l'ATH-RA avec les paramètres définis. La Figure 4.3 montre l'interface du logiciel SCANeR™.



Figure 4.3 Interface du logiciel de simulation SCANeR

- **Simulation d'un Affichage Tête Haute Réalité Augmentée (ATH-RA)**

L'ATH-RA a fait l'objet d'une simulation stéréoscopique virtuelle, et a été implémenté à travers le plugin visuel du logiciel de simulation SCANer. L'information est perçue à une certaine profondeur calculée par rapport au conducteur, entre le cockpit du véhicule et l'environnement de conduite.

- **Validation par les experts de simulation**

Les ingénieurs et les experts du Centre de Réalité Virtuel au Technocentre Renault, ont participé à la mise en place : des aspects de la simulation, des paramètres RA, et à affiner les hypothèses. En effet, plusieurs paramètres ont été ajustés durant les différentes expérimentations : la distance de projection, les différents événements et les situations définies dans les scénarios de conduite.

#### **1.4. ART- Tracking pour le suivi de tête**

- **La vision stéréoscopique et le système de suivi optique**

Le système ART (Advanced Real Time Tracking- en anglais) est utilisé pour récupérer la position du conducteur en temps réel, au moyen de marqueurs infrarouges rétro-réfléchissants montés sur des lunettes 3D actives, et deux caméras infrarouges, les informations sont ensuite traitées avec le logiciel spécialement dédié DTrack Optical Tracking System Software (cf. Figure 4.4).



*Figure 4.4. Lunettes 3D stéréoscopique ART (Advanced Real-Time Tracking)*



- **Les caractéristiques techniques**

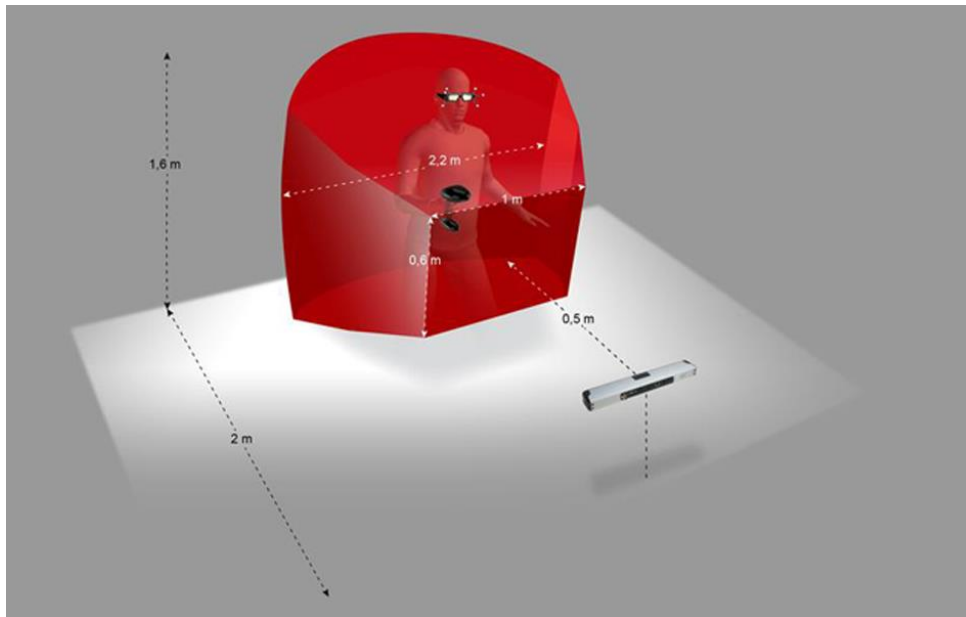


Figure 4.5 Caractéristiques techniques de l'ART

- **Phase de calibration**

La position initiale a été mesurée pour chaque conducteur au début de chaque expérimentation pour :

- Mesurer la PMC durant toutes les sessions de conduite par rapport à cette position
- Projeter l'ATH-RA par rapport à cette position centrale de conduite durant la condition « Tracking OFF »

## 2. Expérimentation avec des conducteurs volontaires

Pour des raisons de logistique et de confidentialité, les sujets ont été recrutés au sein du Technocentre Renault dans différents services.

### 2.1. Différence inter-individuelle

Les sujets se caractérisent par différents paramètres qui peuvent influencer les conditions expérimentales : l'âge, le sexe, l'expérience de conduite, l'expérience dans un environnement virtuel, le type de conduite, l'acuité visuelle, la sensibilité au mal du simulateur...

Nous ne pouvons pas contrôler toutes ces variables, car l'augmentation du nombre de modalités nécessite un plus grand nombre de sujets. Cependant il est impératif de limiter l'effet de ces variables parasites pour la validé des expérimentations. Dans notre cas, le

passage des sujets se fait d'une manière aléatoire. Dans la mesure du possible, un équilibrage des groupes expérimentaux est réalisé avec une variation systématique des paramètres pour que tous les états soient représentés.

## 2.2. Différence intra-individuelle

Cette différence concerne les variations sur le même individu qui apparaissent en fonction de l'état psychologique et physiologique de la personne à un instant donné : le temps de passage de test (matin, soir, avant manger, après manger...), l'état de fatigue ou de stress...

Les horaires de passage des expérimentations sont définis entre 8h du matin et 17h. Nous ne pouvons pas réquisitionner l'utilisation des moyens expérimentaux pendant plusieurs jours sur les mêmes créneaux horaires. Cependant, nous estimons que ces créneaux horaires de travail sont bien adaptés pour mener nos tests, et la méthode de mesures répétées a été utilisée, ce qui fait que tous les sujets ont été confrontés à toutes les conditions expérimentales, car l'échelle d'appréciation peut varier d'un sujet à un autre. Un contre-balancement des conditions expérimentales a été également introduit dans toutes les expérimentations réalisées pour éviter un effet d'apprentissage.

## 2.3. Mal du simulateur

C'est un phénomène connu et très courant lors de l'utilisation des simulateurs de conduite. La durée de conduite a été volontairement réduite afin de limiter les symptômes du mal du simulateur. Il a été demandé aux sujets, de signaler tout malaise ressenti à l'apparition (nausée, maux de tête, palpitations, transpiration, ou tout autre symptôme), et ce à n'importe à quel stade de l'expérience.

## 3. Plan expérimental

Dans un plan expérimental complet, toutes les combinaisons possibles sont réalisées, et le nombre maximal d'essais est de  $N = \mathbf{N}^F$  ; avec  $F =$  le nombre de facteurs et  $N =$  le nombre de niveaux. Un maillage rectangulaire est réalisé, et on retrouve chaque niveau d'un facteur associé à tous les niveaux des autres facteurs. L'autre possibilité est d'utiliser des plans factoriels fractionnaires, qui présentent plusieurs avantages, cependant, ils ne sont constitués que d'un sous ensemble du plan complet pour pouvoir diminuer le nombre d'essais. En réalité il y a une perte d'informations avec cette méthode, en plus d'une forte variabilité inter-sujets : expérience de conduite, expérience de simulation, âge, capacités visuelles... C'est pourquoi nous avons opté pour un plan expérimental complet.

## 4. Évaluation des résultats

### 4.1. Les variables indépendantes

Les variables indépendantes dans le cadre expérimental sont des facteurs contrôlés volontairement par l'expérimentateur aux niveaux définis dans le protocole expérimental. Dans la phase d'analyse, un certain nombre de paramètres sont examinés en fonction de ces variables indépendantes pour évaluer leurs effets. Les facteurs sont sélectionnés rigoureusement. Malgré l'influence que peuvent avoir certains paramètres, nous ne pouvons pas tous les intégrer aux variables expérimentales par souci d'économie du nombre d'essais et de sujets.

### 4.2. Les variables dépendantes

Les variables dépendantes sont celles que l'on souhaite mesurer par rapport à la condition changeante. Dans la partie de l'analyse subjective, on souhaite évaluer la perception des sujets et la différence perçue, ainsi qu'un ensemble de paramètres (détaillés dans chaque partie expérimentale associée) qui vont permettre d'accompagner les résultats objectifs.

#### Évaluation subjective

Des analyses subjectives ont été réalisées pour toutes les expérimentations. Il s'agit de questionnaires établis au préalable, qui sont complétés par les sujets après le passage de chaque condition expérimentale. Une comparaison est réalisée sur un ensemble de paramètres déterminés en fonction des variables indépendantes définies dans le protocole expérimental. Cela permet de connaître l'état des conducteurs, d'expliquer leur comportement, et de récolter des données qui ne sont pas mesurables/ ou difficilement mesurables objectivement, notamment, les différences perçues entre les parcours correspondants aux différentes conditions expérimentales.

#### Évaluation objective

##### *Mesure de la PMC*

La parallaxe de mouvement conducteur est mesurée sur tout le parcours de conduite pendant toutes les conditions expérimentales.

##### *Mesure des performances de conduite*

Les données de performance de conduite sont sauvegardées grâce au logiciel de simulation et sont analysées à posteriori en fonction des variables indépendantes définies dans le protocole expérimental. Les indicateurs de conduite auxquels on s'intéresse concernent la performance liée à la tâche de conduite principale : le maintien de la trajectoire du véhicule et l'orientation du volant (variable en fonction de la vitesse). Ceci permettra d'étudier

l'impact de la PMC sur les performances de conduite. Ces mesures peuvent permettre aussi de quantifier la difficulté de la tâche de conduite principale et l'impact de la tâche secondaire ou l'état de fatigue. Dans notre cas, on peut par exemple comparer cette influence durant les deux parcours (avec et sans prise compte de la PMC) et lors de la réalisation des tâches complémentaires.

L'ensemble des indices permettant de quantifier le comportement des conducteurs sur le contrôle de la direction du volant :

## 5. Tests statistiques

### 5.1. Utilisation des tests non-paramétriques

Nous avons vérifié les conditions d'application des différents tests statistiques en fonction de notre plan expérimental. Nous avons appliqué des tests non-paramétriques qui conviennent aux nombre d'échantillons utilisés, et pour une comparaison de plusieurs moyennes. Lors des expérimentations sur de petits échantillons, il est plus prudent d'utiliser des tests d'ordre dits « non paramétrique », car on ne peut pas garantir une distribution normale des résultats.

### 5.2. Test de Wilcoxon

Le test de Wilcoxon est un test non paramétrique utilisé pour des échantillons appariés à variables ordinales. Il permet de comparer des moyennes et de calculer les différences par la méthode des rangs. Le test des rangs signés de Wilcoxon pour échantillons appariés est une alternative au test t-student lorsque les hypothèses de ce dernier ne sont pas valables. Il permet de comparer deux mesures d'une variable quantitative effectuées sur les mêmes sujets.

### 5.3. Test de Friedman

Le test de Friedman est un test non paramétrique utilisé pour k échantillons et un groupe apparié (plusieurs mesures sur les mêmes sujets). C'est une alternative à l'analyse de variance à mesures répétées lorsque la normalité des variables n'est pas respectée.

Formule du test de Friedman : 
$$X^2 = \frac{12}{Nk(k+1)} \sum (R_j)^2 - 3N(k+1)$$

Avec : N= nombre de lignes, k= nombre des colonnes

R<sub>j</sub>= somme des rangs de la j<sup>ème</sup> colonne

Et Σ nous indiquent qu'il faut additionner les carrés des sommes des rangs de toutes les colonnes.

H<sub>0</sub> : représente l'hypothèse nulle, et signifie que les échantillons proviennent de la même population

**H<sub>a</sub>** : les échantillons proviennent de populations différentes

En fonction de la valeur de  $p$  calculée, on décide d'accepter ou de rejeter l'hypothèse **H<sub>0</sub>**. Si  $p$  est inférieur au niveau de signification **alpha=0.05** ( $p < 0.05$ ), l'hypothèse **H<sub>0</sub>** est rejetée. On peut déduire dans ce cas qu'il y a au moins une différence entre les conditions expérimentales. Afin d'affiner les résultats et détecter les différences significatives, il est nécessaire de réaliser un test post-hoc adéquat.

#### 5.4. Test de Nemenyi

Le test de Nemenyi (Zae, 1999) est un test post-hoc non paramétrique. Il est utilisé pour détecter quel échantillon est différent de l'autre, avec des comparaisons multiples par paires (test bilatéral).

#### 5.5. Le test « r » de Bravais-Pearson

**Les tests de corrélation** : ou la « force » d'une liaison entre deux, ou plusieurs séries de données.

$$\text{Formule : } r = \frac{\sum (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sqrt{\sum (x_i - m_x)^2 \sum (y_i - m_y)^2}}$$

(Avec  $x_i$  = valeurs échantillon 1,  $y_i$  = valeurs échantillon 2, et  $m$  = moyenne échantillon)





# Chapitre 5 - Étude de l'impact de la PMC avec un ATH-RA

L'expérimentation est menée afin de **vérifier** la génération de la PMC par les conducteurs et d'**étudier** l'impact de sa correction lors de l'utilisation d'un ATH-RA. La simulation virtuelle de conduite et de l'ATH-RA a permis de tester les deux conditions expérimentales définies et de comparer la perception des informations RA, le comportement du conducteur et les performances de conduite.

## 1. Méthode

### 1.1. Simulation d'un ATH-RA

L'information RA consiste en un cadrage adaptatif des véhicules devant le conducteur (cf. Figure 5.1) pour une meilleure saillance visuelle. L'objectif est d'attirer l'attention du conducteur sur les véhicules à proximité sans encombrer son champ visuel de conduite ni sa charge mentale. La distance de projection de cet ATH-RA virtuel est de 3m et la distance de l'écran du CAVE P2I par rapport au conducteur est d'environ 2.5m.



Figure 5.1. ATH-RA cadrage dynamique des véhicules en RA

### 1.2. Scénario de conduite

Le scénario a été conçu de manière à reproduire exactement les mêmes conditions de circulation durant les deux sessions de conduite, afin de garantir la cohérence des résultats expérimentaux. Il est constitué d'un environnement urbain segmenté en 5 situations de conduite : lignes droites, virages, intersections, dépassements, et tâches complémentaires. La visibilité durant la conduite était volontairement réduite (temps sombre et nuageux) pour renforcer l'utilité de la RA. L'indication de l'itinéraire est faite avec un véhicule lièvre (un



véhicule de police facile à reconnaître), contrôlé par des algorithmes de circulation et modulant la vitesse en fonction du comportement du sujet afin de rester en vue.

Nous avons explicitement demandé aux sujets de respecter le code de la route et de faire attention tout comme ils le feraient naturellement dans leur propre véhicule durant une conduite réelle. Deux tâches complémentaires ont été réalisées par les sujets à des endroits définis dans le scénario par un son spécifique.

- Tâche complémentaire « Téléphone »

Il a été demandé aux sujets de saisir le téléphone initialement positionné sur le siège du copilote lors du retentissement de la sonnerie du téléphone, de raccrocher et de le remettre à sa place.

- Tâche complémentaire « Boite à gants »

Il a été demandé aux sujets d'atteindre la boite à gants virtuelle (cockpit du véhicule visible en stéréovision), comme pour l'ouvrir et la refermer, tout en restant attentif aux événements de la route.

### **1.3. Procédure**

Une phase de familiarisation d'environ 3 minutes a été réalisée par les sujets pour : prendre en main le simulateur de conduite, expérimenter l'environnement virtuel de conduite, se familiariser avec l'ATH-RA, et s'entraîner sur les tâches complémentaires. Les sujets qui ont manifesté un mal du simulateur durant cette phase ont été directement exclus de l'expérimentation. Deux sessions de conduite d'environ 6 minutes chacune ont été effectuées par les sujets. Durant l'une des sessions de conduite, l'ATH-RA intègre une correction de la PMC grâce à un système de suivi de tête « Tracking ON ». Durant l'autre session de conduite « Tracking OFF », l'ATH-RA est projeté par rapport à la position initiale mesurée du conducteur. Le parcours de conduite et les événements de la route étant identiques durant les deux sessions de conduite, l'ordre de passage est contrebalancé entre les sujets pour limiter l'effet d'apprentissage. Les sujets ont répondu à un questionnaire intermédiaire après chaque conduite, et un questionnaire final à la fin de l'expérimentation. La durée totale de l'expérimentation, était d'approximativement 45 minutes toutes les phases comprises (pour voir une description plus détaillée cf. Annexe 1).

### **1.4. Variable indépendante et variables dépendantes**

#### **La variable indépendante**

Un facteur à deux niveaux a été introduit lors de cette expérimentation, il s'agit de la correction de la « Parallaxe de Mouvements du Conducteur – PMC », qui se résume à deux conditions expérimentales : Tracking ON/ Tracking OFF.

- Condition 1 « Tracking ON » : les informations de suivi de tête sont prises en compte en temps réel pour l’affichage d’information par rapport à la position du conducteur
- Condition 2 « Tracking OFF » : dans cette condition expérimentale, les mouvements de tête sont négligés. La position centrale de conduite est mesurée pour chaque conducteur durant la phase de calibration (cf. 1.3). Dans ce cas, les informations RA sont projetées par rapport à cette position mesurée en temps réel. Tandis que la scène de conduite continue à utiliser le mouvement induit par le conducteur pour corriger l’erreur dû à l’effet parallaxe, comme c’est le cas dans une situation de conduite réelle. Un exemple de cette condition « Tracking OFF » et lorsque le conducteur génère une PMC est illustré dans la Figure 5.2 ci-dessous.



Figure 5.2 ATH-RA condition 2 « Tracking OFF »

## Les variables dépendantes

Les variables dépendantes sont mesurées par rapport à la condition changeante « La correction PMC pour l’ATH-RA » (Tracking ON / Tracking OFF). Il s’agit de variables subjectives mesurées à l’aide des questionnaires, et des variables objectives de comportement et des performances de conduite.

- **Les questionnaires**

Les sujets ont répondu à un questionnaire intermédiaire identique après chaque conduite (cf. Annexe 2). Dans la première partie, il a été demandé aux sujets de reporter toutes les difficultés ressenties pendant la conduite : mal du simulateur, problème de mise au point, inconfort de perception d’éléments dans la scène de conduite, perturbation de la tâche de conduite principale, fatigue visuelle, et augmentation de la charge mentale. L’échelle de psychométrie de Likert a été utilisée pour les réponses aux questionnaires, avec 5 niveaux d’évaluation : très faible, faible, moyen, élevé, et très élevé. Il a été demandé de reporter également dans quelle situation apparaît la difficulté : intersections, dépassement, virages, lignes droites, tâches complémentaires, ou bien durant toute la session de conduite.

La deuxième partie du questionnaire concerne la précision de l'ATH-RA: la distinction de l'élément réel correspondant à la métaphore virtuelle, et l'alignement du réel et du virtuel. Afin de permettre aux sujets de trancher sur la précision de l'ATH-RA, quatre niveaux de réponses étaient disponibles : très imprécis, imprécis, précis, très précis.

Le questionnaire final, a permis de comparer l'ATH-RA durant les deux sessions de conduite, et de détecter les différences constatées par les sujets. Lorsque une difficulté est notée, elle est reportée sur une échelle allant de : faible différence à forte différence. Enfin, il a été demandé aux sujets de s'exprimer sur la condition expérimentale préférée (session 1/ session 2 / pas de préférence), et d'indiquer les raisons de leur choix. Le degré de préférence est indiqué sur une échelle de faible préférence à forte préférence.

- **Les variables objectives**

## **Mesure de la PMC**

Les mouvements de tête générés pendant la conduite sont mesurés durant toutes les sessions de conduite. Une Parallaxe de Mouvement Conducteur est calculée par rapport à la position centrale de conduite mesurée pendant l'étape de calibration.

## **Les paramètres de performance de conduite**

Les paramètres de performance de conduite sont enregistrés et sont analysés par rapport à la variable indépendante « la correction de la PMC ».

### **1.5. Participants**

27 employés du Technocentre-Renault, possédant un permis de conduire, ont été recrutés pour participer à cette expérimentation. Quatre personnes ont dû arrêter à cause du mal du simulateur. Par conséquent, 23 sujets au total ont pu suivre l'expérience entièrement. 22% ont indiqué une expérience de conduite de moins de 4000 km par an, 17% entre 4000 km et 8000 km par an, et 61% plus de 8000 km par an. Les deux sexes étaient représentés, avec 15 hommes et 8 femmes, âgés entre 22 et 58 ans (moyenne = 35 ans, médiane = 31 ans, écart-type= 9.4). En ce qui concerne l'expérience virtuelle, 13% n'ont jamais conduit un simulateur de conduite, 22% ont déjà conduit une à deux reprises, et 65% ont déjà conduit un simulateur plus de 3 fois. La majorité des sujets ont indiqué faire des tâches secondaires de temps à autre durant la conduite (utiliser un téléphone, fumer une cigarette, manger ou grignoter, et parler avec les autres passagers...) ; 13% très souvent, 26% souvent, 22% de temps en temps, 35% rarement, et 4% jamais. La majorité de ces sujets ont également indiqué respecter la distance de sécurité : 31% très souvent, 65% souvent, 0% de temps en temps, 4% rarement, 0% jamais.

## 2. Résultats

### 2.1. Les résultats subjectifs

Les réponses aux questionnaires ont été normalisées sur une échelle de 20 points pour l'analyse statistique.

#### 2.1.1. Préférence

Sur les 23 sujets, 15 participants ont mentionné une préférence pour l'ATH-RA avec suivi de tête (la condition Tracking ON : 65%). Quatre sujets ont mentionné une préférence pour l'ATH-RA pour la condition « Tracking OFF », et quatre sujets n'ont eu aucune préférence. En ce qui concerne le degré de préférence, le groupe ayant préféré la condition Tracking ON a attribué des notes élevées pour le degré de préférence cette condition (médiane=15). Cependant, une minorité des sujets ont indiqué une préférence pour la condition Tracking OFF (avec un degré de préférence moins élevée que le groupe précédent médiane=10).

#### 2.1.2. La précision de l'ATH-RA

Dans l'histogramme ci-dessous (Figure 5.3), la différence perçue concernant l'alignement de l'ATH-RA entre les différentes conditions expérimentales est analysée dans des situations définies dans le scénario : intersections, dépassement, virages, lignes droites, et tâches complémentaires.

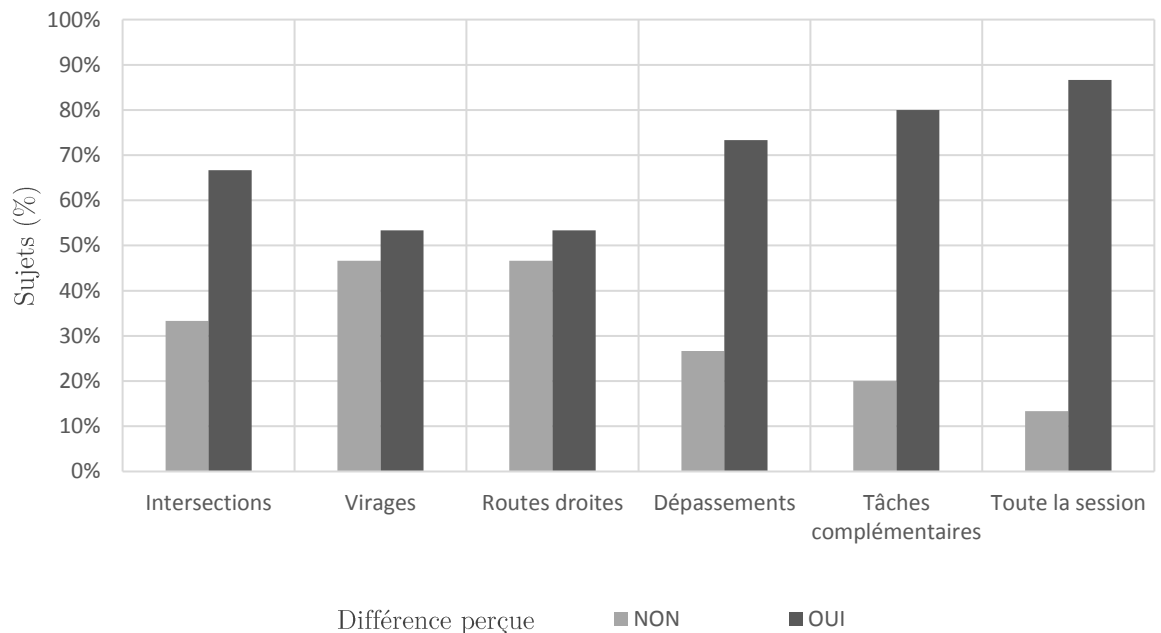


Figure 5.3. Différence perçue entre les deux conduites dans les différentes situations

Pour ceux qui ont constaté une différence de précision entre les deux conditions expérimentales, cette différence a été normalisée sur une échelle de 20 points : de 5 = faible différence à 20 = forte différence. L'histogramme ci-dessous (Figure 5.4) présente les résultats obtenus selon les différentes situations de conduite.

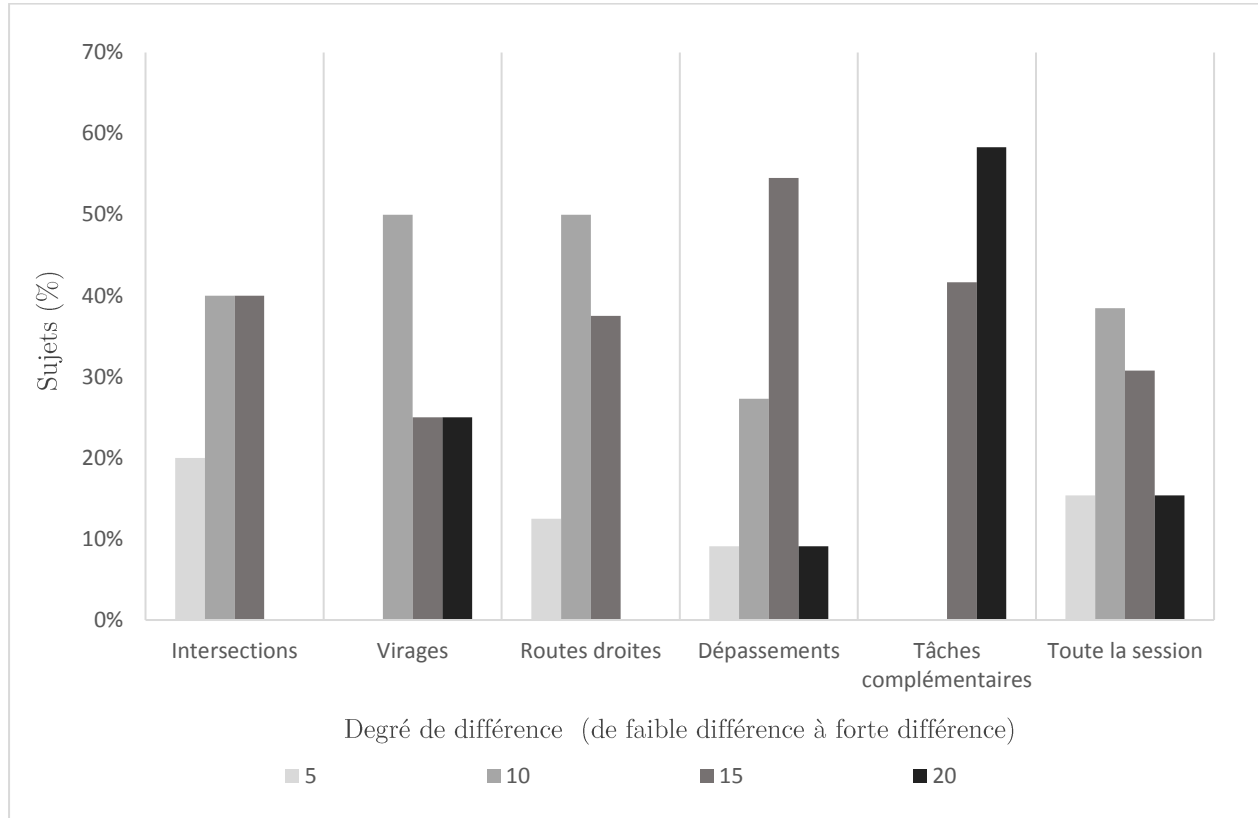


Figure 5.4. Degré de différence de précision entre les deux conduites

Afin de mesurer l'impact de cette différence statistiquement et de vérifier la validité de notre hypothèse, le test non-paramétrique de Wilcoxon a été utilisé, ce qui a donné les résultats suivant :

*Intersections:  $p = 7.1901e-004$ ,  $z = 3.3822$ , Virages:  $p = 0.0246$ ,  $z = 2.2479$ , Lignes droites:  $p = 7.1901e-004$ ,  $z = 3.3822$ , Dépassements:  $p = 0.0025$ ,  $z = 3.0225$ , Tâches complémentaires:  $p = 8.1464e-005$ ,  $z = 3.9401$ , Durant toute la session de conduite:  $p = 0.0019$ ,  $z = 3.1116$ .*

Les différences constatées entre les deux conduites dans les différentes situations sont significatives, puisque les valeurs de  $p$  sont toutes inférieures à 0.05. Lorsque toutes les valeurs durant les mêmes conditions sont utilisées (Tracking ON / Tracking OFF) le test se révèle significatif aussi avec  $p = 4.5667e-008$  et  $z = 5.4674$ .

Les figures ci-dessous (Figure 5.5 ; Figure 5.6), illustrent la précision de l'ATH-RA pour les 15 participants (ayant une préférence pour la condition Tracking ON), durant les deux conditions expérimentales : Tracking ON et Tracking OFF.

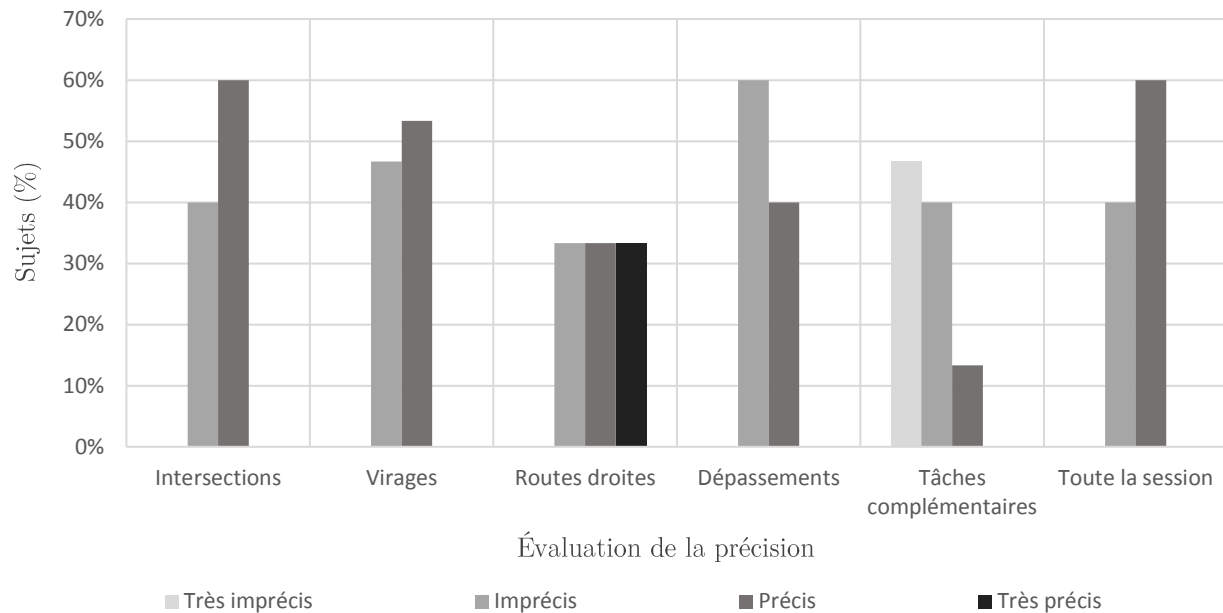


Figure 5.5. Analyse de la précision de l'ATH-RA- condition Tracking OFF

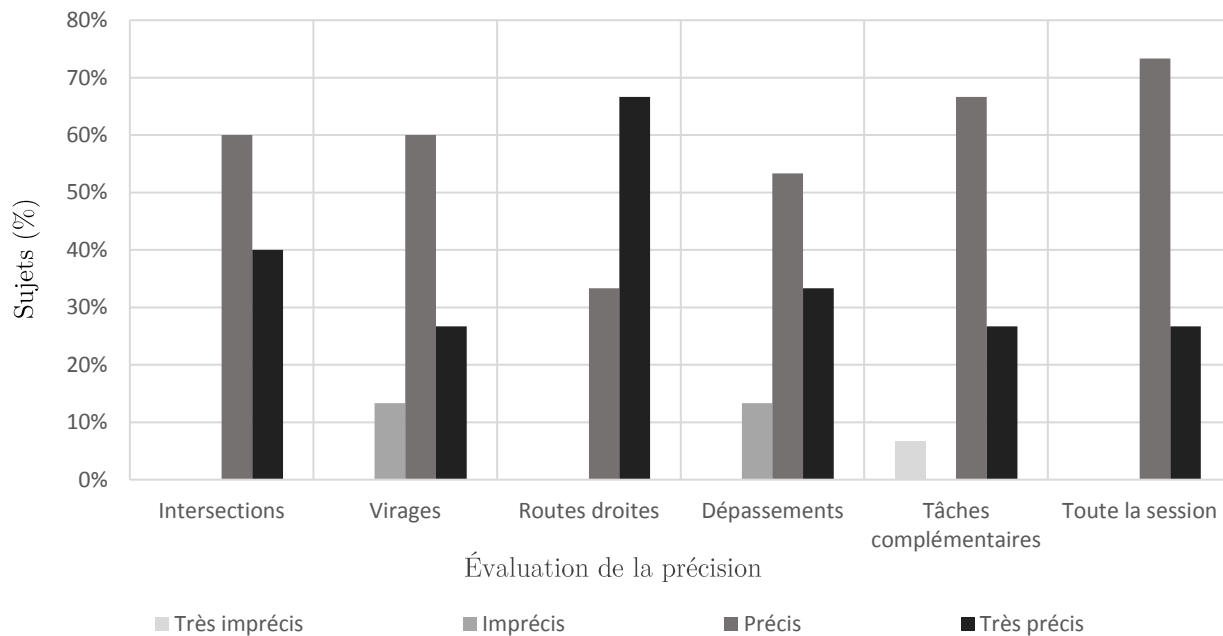


Figure 5.6. Analyse de la précision de l'ATH-RA- condition Tracking ON

## **Autres résultats- population n'ayant pas vu une différence perceptuelle entre les deux conditions expérimentales**

Comme mentionné précédemment, quelques participants n'ont pas constaté de différence perceptuelle de l'ATH-RA entre les deux conditions expérimentales. Quatre participants ont préféré la condition où le suivi de tête n'est pas activé « Tracking OFF ». L'analyse de l'inter-distance pour ces sujets a révélé une plus grande distance avec le véhicule lièvre par rapport aux autres sujets (les sujets ayant une préférence pour la condition Tracking ON). Lors de la comparaison de l'inter-distance entre les différentes sessions des sujets, nous trouvons que le temps d'inter-distance (Time Headway), significativement moins important avec le véhicule lièvre pour le groupe ayant une préférence pour la condition « Tracking OFF » avec  $p = 0.0227$ ,  $z = 2.2786$ . Le comportement des conducteurs sera analysé davantage dans la partie suivante.

## **2.2. Les résultats objectifs**

### **2.2.1. Analyse du comportement des conducteurs**

Pour chacun des paramètres analysés, deux approches sont présentées. Nous commençons d'abord par une comparaison des données entre les deux conditions expérimentales (Tracking ON vs. Tracking OFF) pour tous les participants. Puis nous comparons les deux groupes obtenus lors de l'analyse subjective (préférence pour la condition Tracking ON & préférence pour la condition Tracking OFF). Cette analyse a été réalisée afin de comprendre les résultats subjectifs et de discerner le lien entre la perception des informations RA, le comportement des conducteurs et leur performances de conduite.

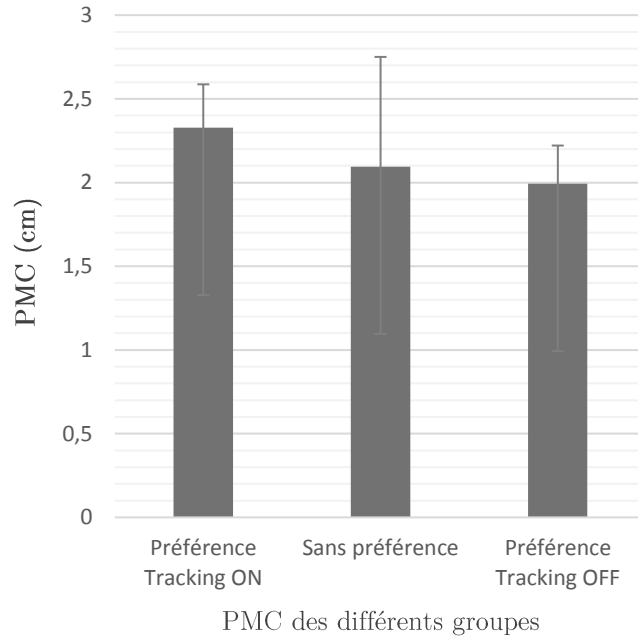
### **2.2.2. La Parallaxe de Mouvement Conducteur (PMC)**

- **La première approche – comparaison de la PMC entre les deux conditions expérimentales pour tous les conducteurs**

Les mouvements latéraux et verticaux de la tête ont été comparés entre les deux conditions expérimentales « Tracking ON vs. Tracking OFF » pour tous les conducteurs. Pas de différence significative n'a été détectée avec le test non paramétrique de Wilcoxon Ranksum :  $p = 0.4738$  &  $z = -0.7163$ ,  $p=0.8144$  &  $z=0.2348$ , respectivement. Ce résultat favorise l'hypothèse que le comportement du conducteur vis-à-vis de la position de conduite adaptée n'a pas été influencé par le facteur expérimental. Cependant, il est possible que les conducteurs n'aient pas adopté le même comportement et position de conduite pendant les conditions expérimentales. Dans la partie qui va suivre (seconde approche), nous allons procéder à l'analyse de la PMC en se basant sur les résultats subjectifs obtenus.

- **La seconde approche – comparaison de la PMC des groupes obtenus durant l'étude subjective**

Dans la Figure 5.7, ci-dessous, les histogrammes présentent les moyennes des PMC en latérales obtenues pour les trois groupes révélés lors de l'étude subjective (Préférence pour la condition Tracking ON, Sans Préférence, Préférence pour la condition Tracking OFF – respectivement), avec l'intervalle de confiance à 95%.



*Figure 5.7. Parallaxe de Mouvement Conducteur (cm)*

Pour le premier groupe « Préférence Tracking ON », la PMC est significativement moins importante pour la condition Tracking OFF, durant les tâches complémentaires, Wilcoxon Ranksum :  $p = 0.0203$ ,  $h = 1$ ,  $z = 2.3207$ . Dans la Figure 5.8 ci-dessous, une comparaison de la PMC est représentée durant la réalisation des tâches complémentaires.



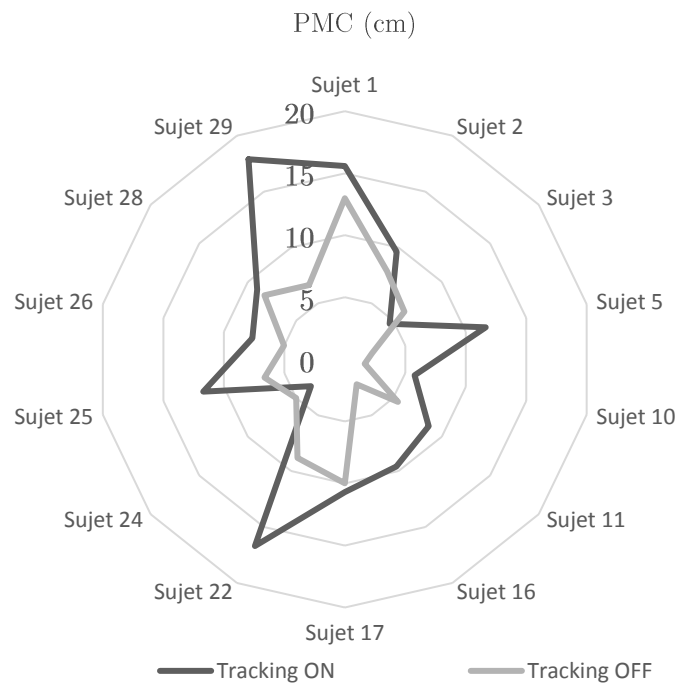


Figure 5.8. Spider Chart de la PMC (cm) durant les tâches complémentaires pour le groupe avec préférence pour la condition Tracking ON

Selon les résultats de l'étude subjective (basée sur les questionnaires), le dépassement est une autre situation qui génère une difficulté perceptive et un problème d'alignement assez important lorsque le suivi de tête n'est pas activé pour l'ATH-RA (condition Tracking OFF). Les tendances de la PMC latérale durant les deux sessions de conduite sont présentées dans la Figure 5.9.

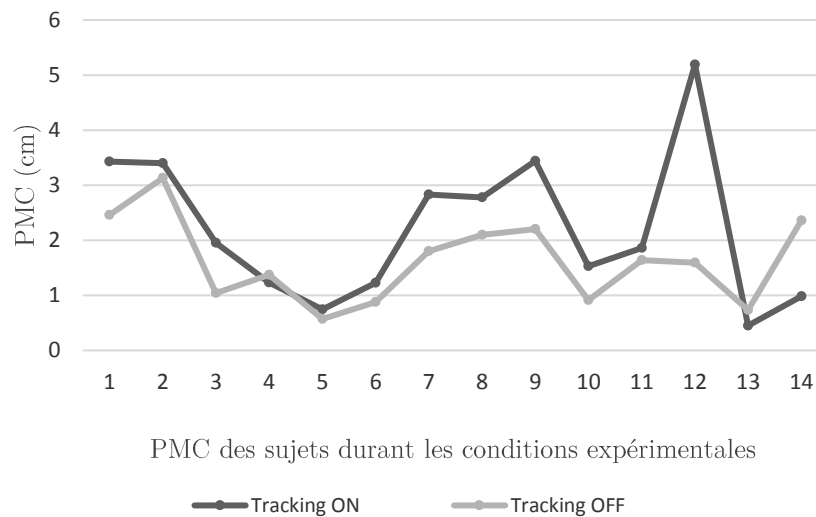


Figure 5.9. Moyennes PMC durant les dépassements (cm)

Cependant, les tests statistiques n'ont pas confirmés ces tendances (*Wilcoxon Ranksum Test*:  $p = 0.2802$ ,  $z = 1.0799$ ).

### 2.2.3. Inter-distance véhicule (Time Headway)

La distance de sécurité longitudinale entre les véhicules est mesurée généralement en temps, car la distance métrique dépend de la vitesse du véhicule. C'est le temps nécessaire pour atteindre le prochain véhicule sur la voie si la vitesse actuelle ou se trouve le conducteur est maintenue. Il est généralement admis dans la littérature qu'une distance de sécurité doit être environ entre 1.5 et 3 secondes. Cette métrique est utilisée dans certaines études pour indiquer le degré d'attention du conducteur (Golias, Yannis, & Antoniou, 2002). Dans notre cas, cette mesure est comparée entre les différents sujets et entre les conditions expérimentales. L'objectif est de voir s'il y a un changement de comportement entre les deux conditions de conduite. La comparaison de l'inter-distance entre les sujets nous permettra de coupler cette information à l'évaluation subjective pour voir si la distance inter-véhiculaire influence la perception RA.

#### Première approche – comparaison du temps d'inter-distance entre les deux conditions (Tracking ON vs. Tracking OFF)

La comparaison des valeurs d'inter-distance entre les deux sessions (Tracking ON vs. Tracking OFF) n'a pas révélée de résultat significatif ( $p=0.9813$ ,  $z=0.0235$ ).

La condition expérimentale changeante (la correction de la PMC) n'a pas eu d'influence sur le maintien de l'inter-distance avec le véhicule lièvre.

#### Deuxième approche – comparaison du temps d'inter-distance entre les groupes (préférence ON, sans préférence, préférence OFF)

Les valeurs de l'inter-distance de toutes les sessions de conduite ont été comparées entre les groupes (préférence ON, sans préférence, préférence OFF). Les résultats statistiques ont montrés moins de temps d'inter-distance pour le groupe avec la préférence « Tracking ON » ( $p=0.0227$ ,  $z=2.2786$ ). Le groupe sans préférence montre une forte variabilité avec un intervalle de confiance

Dans la Figure 5.10, la moyenne du temps d'inter-distance est représentée pour chaque groupe.

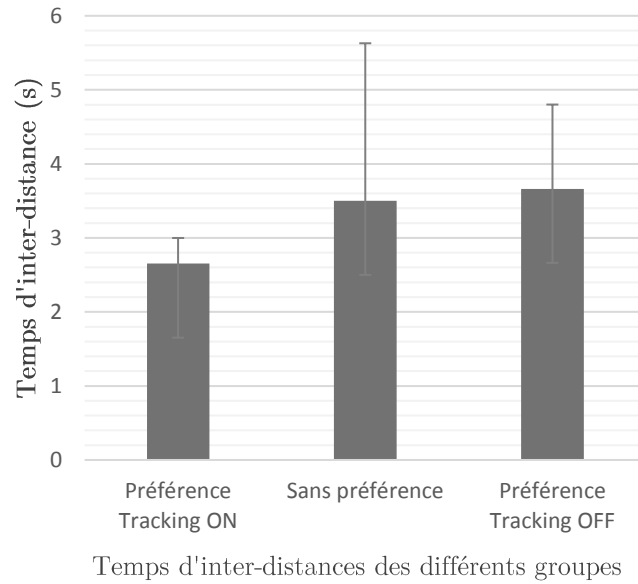


Figure 5.10. Moyenne du temps d'inter-distance (s)

#### 2.2.4. Interaction PMC et inter-distance véhicule

Dans cette partie, nous avons établi un lien entre la Parallaxe de Mouvement du Conducteur et l'inter-distance laissée par le même conducteur. La méthode des moindres carrés a été utilisée pour analyser la corrélation entre ces deux paramètres. Les valeurs moyennes obtenues sont représentées dans la Figure 5.11 ci-dessous.

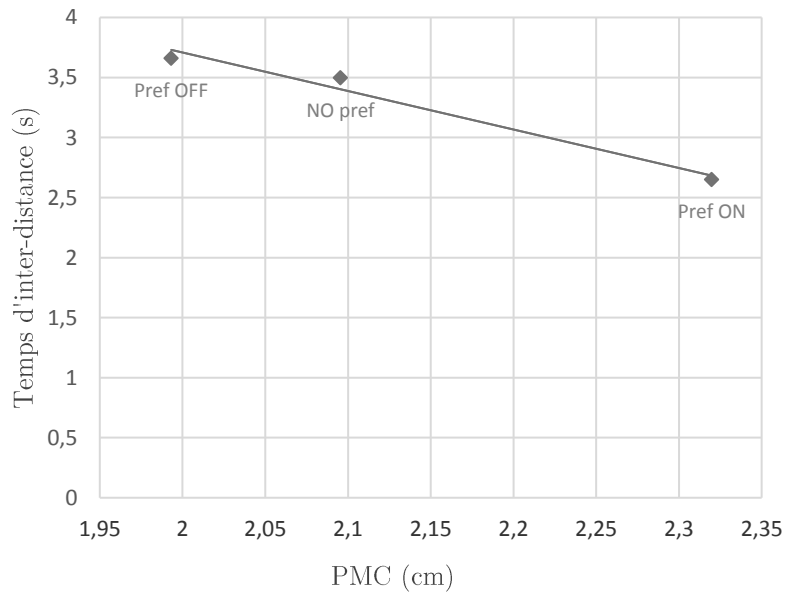


Figure 5.11. Corrélation du temps d'inter-distance et PMC

La Figure 5.11 ci-dessus, suggère une corrélation entre la PMC et le temps d'inter-distance (*Bravis-Pearson Test:  $r=-0.98$* ). Une interprétation possible de ce résultat est que les conducteurs ayant laissé une importante distance de sécurité ne génèrent pas autant de parallaxe (autour de la position initiale de conduite) que ceux qui ont laissé une distance de sécurité moins importante. Ce résultat peut justifier l'impact sur la précision des informations RA pour les différents sujets.

### 2.2.5. La variation de la vitesse

Cet indicateur est souvent utilisé pour mesurer le niveau de confort de conduite. Généralement, moins le conducteur est confortable dans la tâche de conduite, moins la vitesse du véhicule est importante. En effet, le conducteur anticipe sur les difficultés à venir, et fait en sorte de garder au plus un niveau de risque constant. La réalisation d'une tâche secondaire par exemple, a comme effet une diminution de la vitesse, sans doute pour limiter l'exposition aux dangers (Lamble, Kauranen, Laakso, & Summala, 1999; Takezaki, Ueki, & Minowa, s. d.).

Dans notre étude, l'analyse des sessions de conduite a révélé une vitesse moyenne légèrement plus importante durant la condition expérimentale « Tracking ON » (ATH-RA avec suivi de tête), mais cette différence ne s'est pas confirmée avec l'analyse statistique ( $p=0.4248$ ,  $z=0.7982$ ). Cependant, une tendance est observée au niveau de la variation de la vitesse, où l'écart type de vitesse s'est révélé plus important durant la condition « Tracking OFF » dans quelques situations de conduites définies. *Tâches complémentaires: écart-type-vitesse (Tracking-ON)=4.11, écart-type-vitesse (Tracking-OFF)=6.08, Dépassements: écart-type-vitesse (Tracking-ON)=5.84, écart-type-vitesse (Tracking-OFF)=7.73*). La Figure 5.12 ci-dessous montre cette tendance, avec la comparaison des écarts-type de tous les participants.

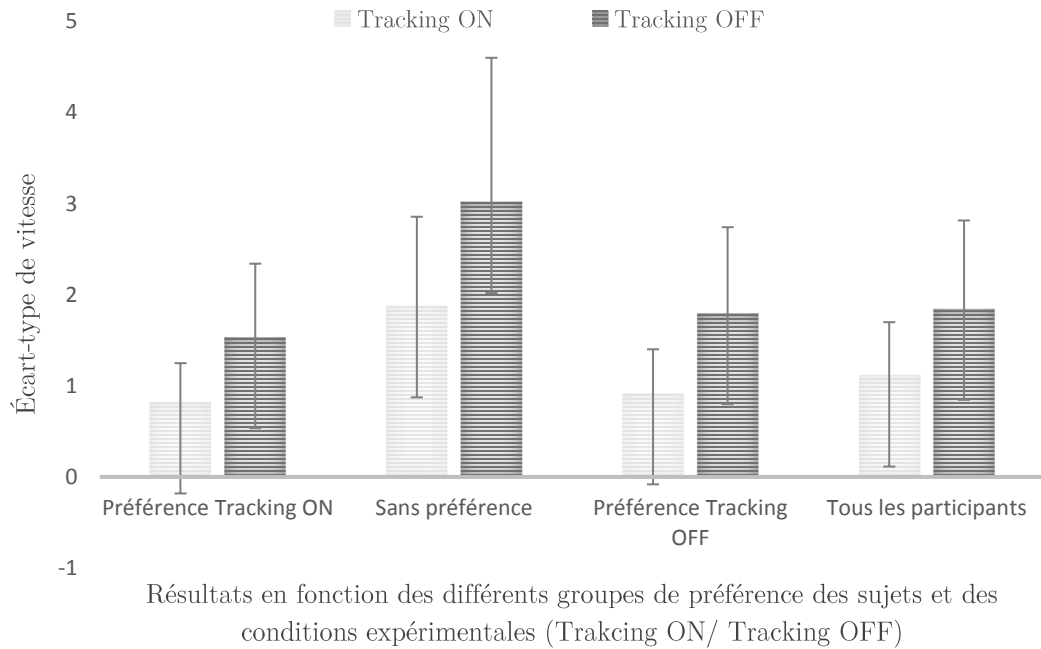


Figure 5.12. Écart-type de vitesse durant les deux conditions expérimentales (Tracking ON / Tracking OFF)

### 2.2.6. Variation de l'angle au volant

Différentes méthodes existent dans la littérature pour caractériser le comportement au volant. Il est généralement admis que c'est une mesure efficace de la performance de conduite (McLean & Hoffmann, 1975).

- **Steering Wheel Angle Standard Deviation (SWSD)**

Ecart type de l'angle au volant, est appelé en anglais Standard Deviation of Steering Wheel angle. Ci-dessous, la formule de l'écart type appliqué à l'angle au volant (Liu et al., 1999 ; Boer, 2005).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum (\theta_n - \bar{\theta})^2}$$

$\sigma$ : *ecart type*,  $N$ : *nombre de point*,  $\theta$ : *l'angle au volant*,  $\bar{\theta}$  *moyenne angle au volant*

- **Steering Wheel Angle Reversal Rate (SWRR)**

C'est le nombre de fois par minutes que la direction du volant est inversée, avec un seuil de tolérance défini afin éliminer les erreurs (McLean & Hoffmann, 1975 ; MacDonald and Hoffman, 1980 ; Ostlund et al. 2004; Joakim et al., 2005), telles que les modifications non-volontaires suite à des vibrations du véhicule.

La réalisation de tâches secondaires par exemple, peut distraire le conducteur et avoir une influence sur la modification du taux d'inversions du volant. L'attention requise pour la réalisation d'une tâche secondaire peut induire des erreurs sur la correction de la trajectoire et le maintien du véhicule sur la voie, ce qui peut être observé dans le changement de l'angle au volant (McLean & Hoffmann, 1975). L'écart-type de l'angle au volant est souvent plus élevé lorsque des événements non anticipés surgissent sur la route (Lamble et al., 1999), ou lorsque la charge mentale est plus élevée que d'habitude (McLean & Hoffmann, 1975). Nous analysons ce paramètre afin de comparer le niveau de confort de conduite durant nos deux conditions expérimentales. Si le taux des variations brusques est élevé dans l'un des cas, on peut formuler l'hypothèse que le conducteur est moins confortable en conduite sous cette condition.

Dans notre analyse, le taux d'inversions au volant est calculé avec un filtre à 1° de tolérance. Les premiers résultats montrent une tendance d'un écart type de l'angle au volant inférieur dans la condition « Tracking ON », dans toutes les situations définies : *moyenne (Tracking ON) = 4.21 et écart-type (Tracking ON) = 1.43, moyenne (Tracking OFF) = 4.13 and écart-type (Tracking OFF) = 2.16*. Ce qui peut être interprété par un meilleur contrôle de l'angle au volant lors de la condition Tracking ON, suite à un meilleur confort pendant cette conduite. Des recherches supplémentaires avec plus de participants sont nécessaires afin de confirmer cette tendance de meilleure performance et de contrôle de la trajectoire.

### 2.2.7. Accélération et freinage

Le nombre d'appuis sur le frein peut indiquer le niveau d'alerte du conducteur et le niveau de difficulté de la tâche de conduite (notamment lors de la réalisation d'une autre tâche). Les auteurs dans (P. Green, Hoekstra, Williams, Wen, & George, 1993) ont enregistré une légère augmentation dans l'écart type du freinage lors de la réalisation d'une tâche secondaire de téléphone. La sensibilité de la pédale de frein reflète l'attention requise pour le conducteur pour réaliser une tâche donnée (P. Green et al., 1993).

Dans notre étude, l'analyse de l'activité de freinage n'a pas révélée de différence significative entre les deux conditions expérimentales. Cependant, le taux de freinage et de la force de freinage sont légèrement supérieurs pour la condition « Tracking OFF » durant les dépassements et la réalisation des tâches complémentaires. Ces résultats sont résumés dans le Tableau. 1 ci-dessous.

Tableau 5.1 Analyse du freinage

		Freinage: taux par seconde et Force en Newton	
		Tracking ON	Tracking OFF
Dépassements	Taux de freinage	3.97 t/sec	5.27 t/sec
	Force	23.02 N	35.84 N
Tâche complémentaire 1	Taux de freinage	0.35 t/sec	0.94 t/sec
	Force	1.99 N	9.72 N
Tâche complémentaire 2	Taux de freinage	0.65 t/sec	0.83 t/sec
	Force	5.06 N	49.44 N

Ce résultat peut être associé à l'hypothèse précédente qui stipule que la vitesse est plus stable durant la condition expérimentale « Tracking ON ». La force de freinage moyenne et le taux de freinage moyen sont légèrement plus élevés pour la condition « Tracking OFF ». Cependant, le test statistique ne s'est pas révélé significatif, possiblement à cause d'une forte variation inter-sujets. Des études complémentaires avec plus de participants sont nécessaires pour confirmer ces hypothèses et conclure sur le changement du taux de freinage et d'accélération durant la conduite avec un ATH-RA.

### 3. Discussion

Les sujets ont évalués l'ATH-RA avec suivi de tête « Tracking ON » globalement plus confortable et plus précis dans toutes les situations définies. La majorité des sujets a mentionné une différence significative dans la précision de l'alignement des informations RA. Par conséquent, une forte préférence a été enregistrée pour cette condition. Cependant, quelques personnes n'ont pas constaté de différence significative entre les deux conditions expérimentales, et certains d'entre eux ont mentionné un meilleur confort de conduite durant la condition « Tracking OFF ». Ces mêmes sujets ont mentionnés pendant la phase de débriefing qu'ils n'avaient pas prêté énormément d'attention à l'ATH-RA et l'alignement des informations virtuelles puisque le véhicule augmenté était bien éloigné, et ils se sont pleins d'une grande fatigue visuelle. L'analyse approfondie a révélé que ces sujets ont expérimenté une plus grande fatigue visuelle liée à un écart important de l'inter-distance avec le véhicule lièvre. En effet, le véhicule est augmenté avec une image virtuelle projetée à 3m, plus la distance avec ce véhicule est grande plus cela génère un conflit de convergence, et plus la fatigue visuelle peut s'accroître rapidement. En outre, ce conflit de convergence se rajoute à un conflit existant dans un environnement de simulation visuelle « le conflit accommodation convergence ».

Dans nos résultats expérimentaux, les variations de la PMC latérales ont montrées une large différence interindividuelle, et nous avons suggéré un lien avec le comportement du conducteur et du choix d'une certaine distance de sécurité avec le véhicule lièvre. C'est peut-être aussi la raison pour laquelle aucune différence significative n'a été détectée dans certains paramètres objectifs de conduite. Cependant, notre hypothèse concernant l'adaptation d'une certaine stratégie de conduite s'est confirmée dans le cas où les conducteurs devaient réaliser des tâches complémentaires durant la conduite. En effet, lorsqu'on compare les variations de la PMC latérales sur la fenêtre de la réalisation de la tâche (début de tâche + après la tâche), les mouvements de tête sont significativement moins importants dans la condition « Tracking OFF ». Ce qui peut vouloir dire que les sujets reviennent plus rapidement dans une position qui se rapproche de la position centrale de conduite pendant la condition « Tracking OFF ».

Le groupe qui a manifesté un meilleur confort visuel avec l'ATH-RA avec une forte préférence pour la condition « Tracking ON » est le groupe qui a enregistré une plus grande variation d'amplitude latérale de la PMC, mais une vitesse de conduite relativement plus stable en moyenne (cf. Figure 5.7 ; Figure 5.12).

Dans certaines études de la littérature, l'analyse des paramètres de performances de conduite comme la vitesse, l'angle au volant et l'accélération, montre des différences significatives lorsque la charge mentale est importante en effectuant des tâches secondaire (Golias et al., 2002; Lamble et al., 1999; Yan Yang, 2011). Dans notre étude, les situations de conduite n'avaient pas pour but de distraire le conducteur ni d'augmenter la charge mentale pendant la conduite. L'objectif était de faire des manipulations de bases et de reproduire les postures de conduite habituelles du conducteur, puis de voir si la stratégie du conducteur change avec le changement de la condition expérimentale.

Dans la littérature, il est admis qu'en conditions de visibilité réduite les véhicules devant le conducteur ont une influence sur le comportement du conducteur et sur le maintien de la trajectoire. Dans notre étude, les conducteurs n'ont pas utilisé cette information exclusivement puisque la route était encore un peu visible, car un compromis a dû être fait entre le réalisme de la simulation virtuelle et la condition de visibilité réduite.

L'autre hypothèse qui découle des résultats objectifs est que la métaphore utilisée dans le cadre de cette étude n'est peut-être pas suffisamment adaptée pour observer une forte modification au niveau du comportement avec le changement de la condition expérimentale. Cela nous a conduit à mener une réflexion sur la métaphore RA pour la future expérimentation.



## Conclusion

L'impact de la PMC lors de l'utilisation d'un ATH-RA a été étudié avec une simulation virtuelle dans la Plateforme d'Intégration Interactive P2I CAVE - simulateur de conduite de Renault. Nous avons supposé que cet affichage devrait incorporer une correction de la PMC pour limiter les erreurs de perception visuelle et garantir un alignement adéquat dans toutes les situations habituelles auxquelles se confrontent les conducteurs. Les erreurs de perception peuvent être fatales car elles peuvent provoquer : une confusion chez le conducteur, l'abstraction d'informations importantes, une mauvaise appréciation de la profondeur ou l'estimation de la distance des objets. Cela pourrait également avoir une influence directe sur le comportement des conducteurs et sur leur performance de conduite.

Comme illustré dans la présentation des résultats précédents, la majorité des sujets ont constaté que l'ATH-RA, avec la correction de la PMC, est significativement plus précis en termes d'alignement réel-virtuel durant toutes les situations définies (lignes droites, virages, dépassements, intersections, et tâches complémentaires). En conséquence, l'ATH-RA est plus confortable visuellement durant la condition « Tracking ON » ce qui a poussé la majorité des sujets à signaler une forte préférence pour cette condition expérimentale. Cependant, les indicateurs objectifs de confort de conduite n'ont pas montré de différence significative de comportement du conducteur ni de ses performances en fonction de la correction de la PMC.





# Chapitre 6 – Études Expérimentales sur le Simulateur CCARDs

Nous présentons dans ce chapitre, les deux expérimentations réalisées dans le simulateur de conduite de Renault « CCARDs », avec la simulation d'un ATH-RA stéréoscopique. Nous avons montré dans l'expérimentation précédente que la prise en compte de la PMC lors de l'utilisation d'un Affichage Tête Haute Réalité Augmentée (ATH-RA) permet d'améliorer le confort perceptuel. Les erreurs d'alignements générées par la PMC peuvent interférer avec d'autres éléments de la scène visuelle et peuvent produire d'autres gênes. Les résultats obtenus lors de l'expérimentation précédente seront vérifiés avec un simulateur de conduite doté d'un écran visuel panoramique, avec une plus grande résolution stéréoscopique, et qui utilise un vrai cockpit de véhicule permettant au conducteur une meilleure immersion dans l'environnement de conduite et contribuant ainsi à l'amélioration de la sensation de présence (Mestre, 2006). De plus, plusieurs modifications ont été effectuées au niveau du protocole expérimental. Nous avons tout d'abord choisi de travailler avec une nouvelle métaphore visuelle pour la RA. Il s'agit de l'augmentation des lignes de marquage au sol pour guider les conducteurs dans le maintien de la voie. Nous avons également introduit des paramètres supplémentaires par rapport à l'expérimentation précédente afin de déterminer l'effet de la distance de projection de l'ATH-RA, puis l'influence de la condition de visibilité sur la perception du monde mixte et le lien avec la PMC.

## 1. Impact de la PMC et de la distance de projection avec ATH-RA virtuel

### 1.1. Objectif

Quatre conditions expérimentales ont été évaluées et comparées durant cette expérimentation. Le but est de **déterminer** l'impact de la correction de la PMC et de la distance de projection sur la perception RA des conducteurs.

### 1.2. Méthode

#### 1.2.1. Simulation d'un ATH-RA

L'expérimentation est réalisée dans un simulateur de conduite CCARDs de Renault, avec une simulation virtuelle d'un ATH-RA qui permet d'augmenter les lignes de marquage au sol pour mieux les percevoir et anticiper la trajectoire du véhicule. La métaphore utilisée

dans cette expérimentation concerne l'augmentation des marquages au sol, car c'est une information pertinente pour le contrôle de la trajectoire du véhicule. Nous pouvons citer comme exemple, l'étude effectuée par Riemersma (Riemersma, 1981), qui a démontré que le mouvement apparent du bord de la route est un indice pertinent pour le contrôle longitudinal et latéral du véhicule (Mestre, Mars, Durand, Vienne, & Espié, 2005).

Dans la Figure 6.1 ci-dessous une illustration de la simulation virtuelle du ATH-RA.



*Figure 6.1. ATH-RA augmentation des lignes de marquage au sol*

### **1.2.2. Scénario de conduite**

Le parcours de conduite se compose d'une conduite urbaine qui contient des lignes droites et des virages. Une partie du parcours indique une limitation de vitesse à 70km/h, et une autre partie périphérique indique une limitation de vitesse à 90km/h. Le scénario a été conçu de manière à reproduire exactement les mêmes conditions de circulation durant les quatre sessions de conduite dans le but de garantir la cohérence des résultats expérimentaux. L'itinéraire est indiqué par un GPS vocal sans images, afin d'éviter d'interférer avec les informations RA. Le trafic est peu dense pour ne pas perturber l'attention du conducteur, et pour l'inciter à se concentrer plutôt sur le maintien de la trajectoire. La visibilité durant ce parcours est maintenue normale (pas de réduction de luminosité ni de mauvais temps). Il a été indiqué aux participants de respecter strictement le code de la route et de se comporter de manière habituelle comme dans leur propre véhicule.

### **1.2.3. Procédure**

Les participants ont commencé par une phase de familiarisation d'environ 4 minutes, pour prendre en main le simulateur de conduite, expérimenter l'environnement virtuel et se familiariser avec l'ATH-RA. Les sujets les plus sensibles au mal du simulateur ont été exclus de la phase expérimentale. Quatre sessions de conduite au total, d'environ 6 minutes

chacune, ont été réalisées par chaque sujet. Après chaque parcours, les sujets ont répondu à un questionnaire.

#### 1.2.4. Variables indépendantes et variables dépendantes

##### Les variables indépendantes

Deux facteurs, à deux niveaux différents, ont été introduits dans le cadre de cette expérimentation : la correction de la Parallaxe de Mouvement Conducteur – PMC (Tracking ON/Tracking OFF) et la distance de projection (distance 6m/distance 10m), cf. Figure 6.2.

Voici les quatre conditions expérimentales avec toutes les combinaisons :

- Tracking ON & Distance 6m
- Tracking ON & Distance 10m
- Tracking OFF & Distance 6m
- Tracking OFF & Distance 10m

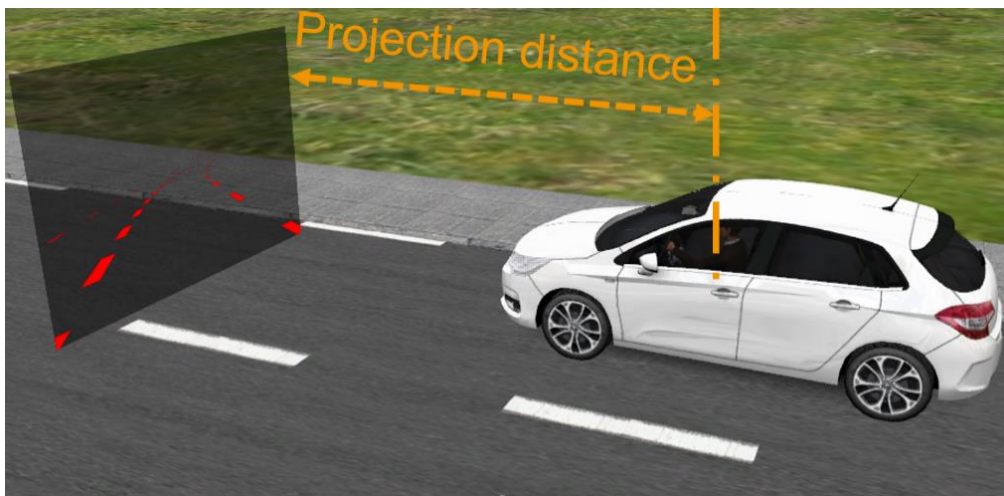


Figure 6.2 Projection de l'ATH-RA dans la scène de conduite devant le conducteur

**Tracking ON** : les informations de suivi de tête sont prises en compte en temps réel pour l'affichage des informations virtuelles par rapport à la position du conducteur.

**Tracking OFF** : dans cette condition expérimentale, les mouvements de tête sont négligés. La position centrale de conduite est mesurée pour chaque conducteur durant la phase de calibration. Dans ce cas, les informations RA sont projetées par rapport à cette position mesurée en temps réel.

**Distance 6m** : les informations RA sont projetées à 6m par rapport à la tête du conducteur.

**Distance 10m** : les informations RA sont projetées à 10m par rapport à la tête du conducteur.

## **Les variables dépendantes**

Les variables dépendantes sont mesurées par rapport aux conditions changeantes : La correction de la PMC pour l'ATH-RA (Tracking ON / Tracking OFF), et la distance de projection de l'ATH-RA (Distance 6m / Distance 10m). Il s'agit de variables subjectives mesurées à l'aide de questionnaires (cf. Annexe 2) et des variables objectives relatives au comportement des conducteurs. Nous comparons les différentes conditions expérimentales et nous analysons la capacité de mise au point, la distinction des marquages au sol, la précision de l'alignement de l'ATH-RA, l'adaptation comportementale, et la préférence des sujets.

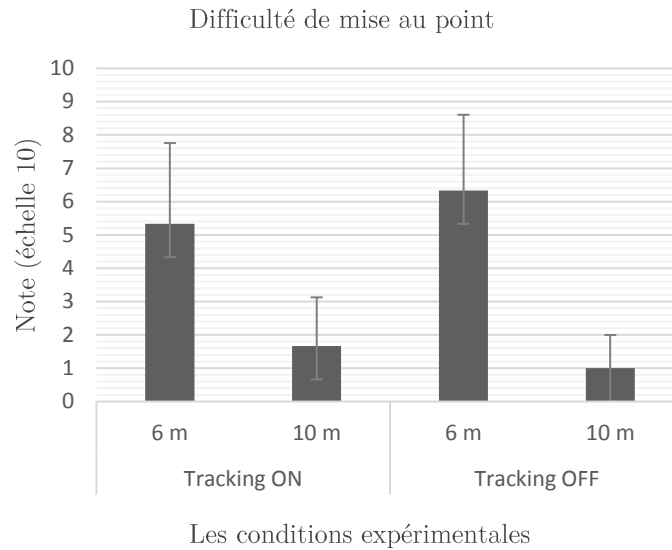
### **1.2.5. Participants**

Dix participants expérimentés (entre 23 et 51 ans) du centre de la Réalité Virtuelle chez Renault ont été recrutés pour participer à cette expérimentation. Les conducteurs n'étaient pas au courant des conditions expérimentales changeantes. Ils ont tous une bonne acuité visuelle naturelle ou alors ils portent des corrections ophtalmiques, et étaient capables de percevoir les images 3D.

## **1.3. Résultat**

### **1.3.1. Capacité de mise au point**

Il a été demandé aux sujets d'estimer la difficulté de mise au point pendant les différentes conditions expérimentales. Une échelle sur 10 points a été utilisée pour normaliser les résultats de : pas du tout=0 (pas de problème de mise au point) à très élevée=10. Les valeurs moyennes sont représentées sur la Figure 6.3 ci-dessous avec un niveau de confiance à 95%.



*Figure 6.3 Moyennes des difficultés constatées*

#### A. Comparaison de la capacité de mise au point selon la PMC

Il n'y a pas de différence significative pour la capacité de mise au point avec ou sans correction de la PMC.

#### B. Comparaison de la capacité de mise au point selon la distance de projection

Une différence significative a été détectée lorsqu'on compare la capacité de focalisation entre les deux distances de projection (6 m vs. 10 m). Les sujets arrivent à faire le net beaucoup plus facilement lorsque l'ATH-RA est projeté à 10m devant eux :  $p=0.0361 < 0.05$ , ( $h=1$ ,  $z=2.0955$ ,  $ranksum=131.5$ ).

Dans la Figure 6.3, on peut noter que selon les sujets, la pire situation rencontrée avec une grande difficulté de focalisation est la condition « Tracking OFF & Distance 6m ».

### 1.3.2. Distinction des marquages au sol

Il a été demandé aux sujets d'indiquer à quel point ils arrivent à distinguer les marquages au sol réels et virtuels et s'ils arrivent à associer correctement les deux environnements (réel et virtuel).

#### A. Comparaison selon la PMC

L'impact de la PMC sur la distinction des marquages au sol réel et virtuel est négligeable. Aucune différence significative n'a été détectée avec ou sans correction de la PMC. Même lorsque les informations ne sont pas suffisamment bien alignées, les sujets arrivent à associer les informations réelles et virtuelles convenablement.



## B. Comparaison selon la distance de projection

Les sujets ont noté une meilleure capacité d'association des informations réelles et virtuelles à 10 m mieux qu'à 6m. La Figure 6.4 ci-dessous montre les moyennes de la capacité d'association réel-virtuel selon les sujets. De plus, quelques difficultés de fusion d'informations à 6m ont été signalées par certains sujets.

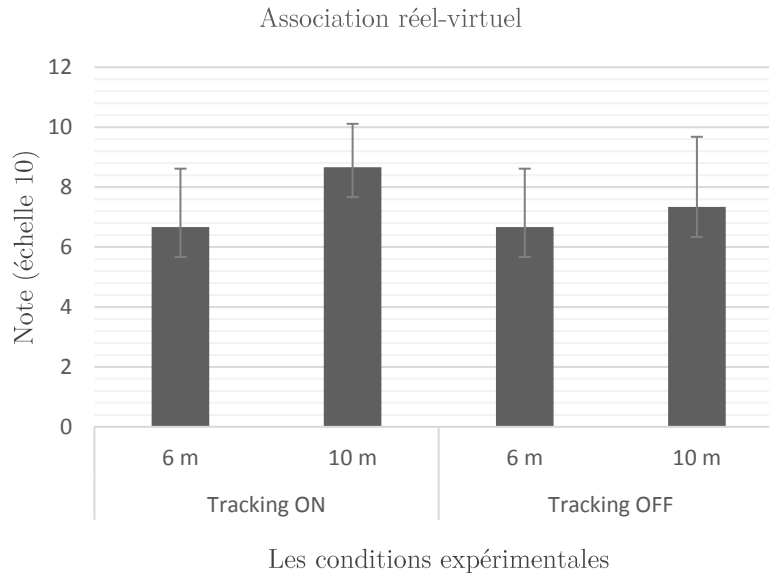


Figure 6.4 Moyennes de la capacité d'association du réel-virtuel

Les tendances montrent que le meilleur cas de figure selon les sujets est la condition expérimentale avec correction de la PMC et une distance de projection à 10m. Cependant, les tests statistiques ne sont pas significatifs pour confirmer cette hypothèse ( $p=0.3435$ ,  $h=0$ ,  $z=0.9473$ ,  $ranksum=117$ ).

### 1.3.3. Précision de l'alignement de l'ATH-RA avec les informations réelles durant les lignes droites et les virages

Il a été demandé aux sujets d'évaluer la précision de l'alignement des informations virtuelles avec l'environnement réel après chaque session de conduite. La Figure 6.5 montre les résultats durant les virages et la Figure 6.6 montre les résultats lors des lignes droites. Les valeurs moyennes sont représentées sur une échelle de 10 points avec un niveau de confiance à 95%.

#### A. Précision de l'alignement durant les virages

La condition « Tracking ON & Distance 10 m » est la situation où la moyenne de la précision de l'alignement a été maximale selon les sujets, et la pire situation est « Tracking OFF & 6m » selon les mêmes sujets.

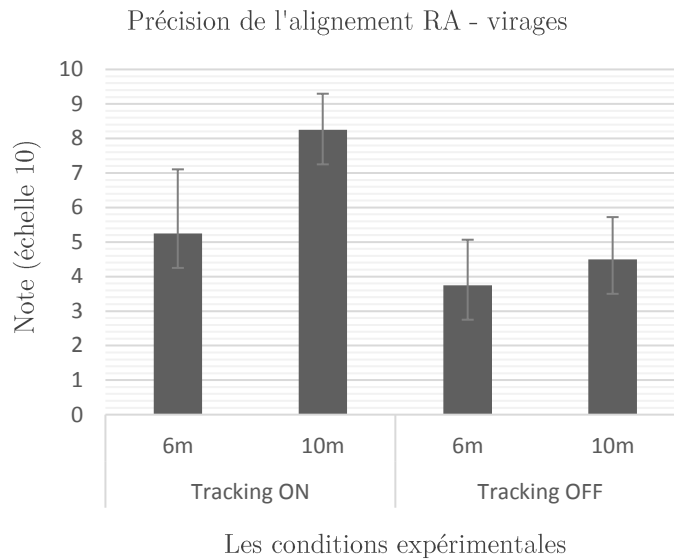


Figure 6.5 Précision de l'alignement ATH-RA durant les virages

### 1- Comparaison de la précision de l'alignement (Tracking ON / Tracking OFF)

Les sujets ont jugé la précision de l'alignement réel-virtuel meilleure durant la condition Tracking ON pour les deux distances de projection.

#### Distance 6m

- Virages : 80% des sujets ont constaté une meilleure précision pendant la condition Tracking ON (10% différence moyenne, 70 % forte différence)
- Lignes droites : 80% des sujets ont constaté une meilleure précision pendant la condition Tracking ON (40% différence moyenne, 40% forte différence)

Le test statistique réalisé pour comparer « distance 6m & Tracking ON » vs. « distance 6m Tracking OFF » est significatif :  $p=0.0015 \ll 0.05$  ( $h=1$ ,  $z=3.1784$ ,  $ranksum=146$ ).

#### Distance 10m

- Virages : 100% des sujets ont rapporté un meilleur alignement dans la condition Tracking ON (10% faible différence, 30% différence moyenne, 60% forte différence)
- Lignes droites : 100% des sujets ont rapporté un meilleur alignement dans la condition Tracking ON (20% faible différence, 70% moyenne différence, 10% forte différence).

Le test statistique réalisé pour comparer les conditions : « distance 10m & Tracking ON vs. distance 10m & Tracking OFF » s'est révélé significatif :  $p=0.0015 <<0.05$  ( $h=1, z=3.1784, ranksum=146$ ).

## 2- Comparaison de la précision de l'alignement (Distance 6m / Distance 10m)

Les sujets ont attribué de meilleures notes pour la précision de l'alignement de l'ATH-RA avec une distance de projection à 10m plutôt qu'à 6m. Les sujets ont mentionné également un meilleur confort avec l'ATH-RA à 10m. Ce qui peut s'expliquer par une meilleure convergence des sujets à 10 m.

Un test statistique a été réalisé pour comparer la précision de l'alignement de l'ATH-RA à la « distance de 10m & Tracking ON » vs. « distance 6m & Tracking ON », et le résultat est significatif :  $p=0.0257 <0.05$  ( $h=1, z=2.2312, ranksum=134$ ).

Nous avons réalisé un autre test statistique pour comparer la précision de l'alignement avec le changement de la distance de projection, mais cette fois-ci dans le cas où la PMC n'est pas corrigée « Distance 6m & Tracking OFF vs. Distance 10m & Tracking OFF », mais aucune différence significative n'a été détectée dans la précision de l'alignement réel-virtuel ( $p=0.7186, h=0, z=-0.3604, ranksum=100$ ). Ce jugement a été probablement influencé par l'erreur de parallaxe. Cela peut s'interpréter par le fait que les informations ne soient pas correctement alignées en profondeur (une bonne amélioration au niveau de l'alignement en profondeur n'a pas été suffisante pour certains sujets à cause de l'erreur de la PMC).

## B. Précision de l'alignement durant les lignes droites

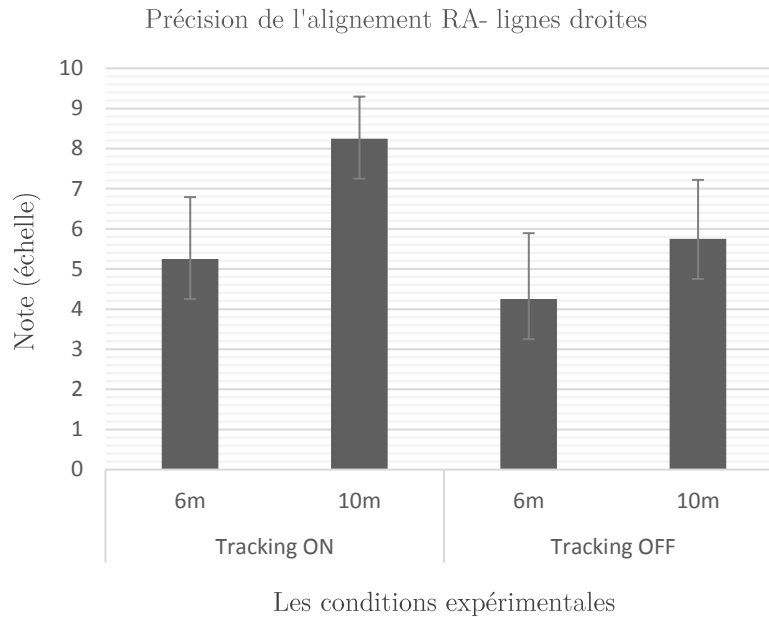


Figure 6.6 Précision de l'alignement durant les lignes droites

**1- Comparaison de la précision de l'alignement avec et sans correction (Tracking ON vs. Tracking OFF)**

L'ATH-RA durant la condition « distance 10 m & Tracking ON » est significativement plus précis que lors de la condition « Distance 10m & Tracking OFF » :  $p=0.0213 < 0.05$  ( $h=1$ ,  $z=2.3031$ ,  $ranksum=134.5$ ).

Cependant, on ne décèle aucune différence significative entre les deux conditions : « Distance 6m & Tracking ON » et « Distance 6m & Tracking OFF » : ( $p=0.2948$ ,  $h=0$ ,  $z=1.0477$ ,  $ranksum=118.5$ ) n'a été détectée. Certains sujets ont indiqué qu'ils ne se fient pas à l'ATH-RA lorsque la distance de projection était à 6m.

**2- Comparaison de la précision de l'alignement pour les deux distances de projection (6m vs. 10m)**

La précision de ATH-RA durant la condition « Distance 10 m & Tracking ON » était significativement meilleure que « Distance 6m & Tracking ON » :  $p=0.0106 < 0.05$  ( $h=1$ ,  $z=-2.5547$ ,  $ranksum=72$ ). Cependant, la comparaison « Distance 10m & Tracking OFF » vs. « Distance 6m & Tracking OFF » n'a pas donné de résultat significatif : ( $p=0.1409$ ,  $h=0$ ,  $z=-1.4723$ ,  $ranksum=86$ ). Ces résultats statistiques sont similaires à ceux obtenus durant les virages, et comme mentionné précédemment, il ne suffit pas d'aligner correctement ces informations en profondeur pour que l'ATH-RA soit précis pour le conducteur, mais il faut aussi assurer un alignement 2D adéquat entre le réel et le virtuel.

### 1.3.4. Comparaison des conditions expérimentales et préférence

- Distance de projection de l'ATH-RA

Tous les sujets ont préféré l'ATH-RA dans la condition expérimentale avec la distance de projection à 10m par rapport à la distance à 6m, avec ou sans correction de la PMC (Tracking ON/ Tracking OFF). L'ATH-RA à 10m était plus confortable visuellement selon les sujets. Ce résultat peut s'expliquer par une meilleure convergence des yeux à la distance de 10m comparativement à celle de 6m.

- La correction de la PMC de l'ATH-RA

La majorité des sujets ont signalé une forte préférence pour l'ATH-RA avec la correction de la PMC « Tracking ON ». Dans l'histogramme ci-dessous (Figure 6.7), les moyennes de préférence des sujets pour cette condition durant les deux distances de projection, avec un niveau de confiance de 95%.

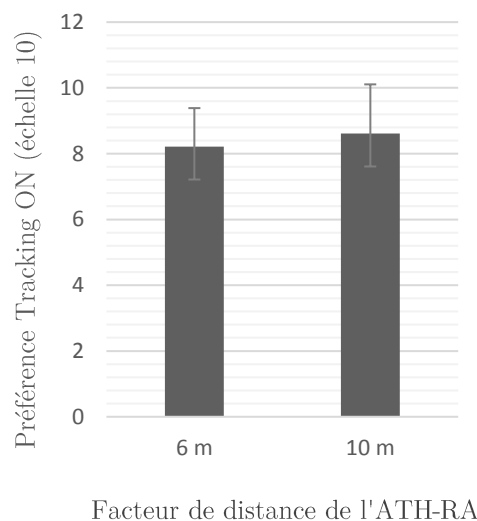


Figure 6.7 Moyennes de degré de préférence pour l'ATH-RA Tracking ON

- Distance 6m

70% des sujets ont mentionné une préférence pour la condition expérimentale « Tracking ON » : moyenne = 8.21, médiane= 7.5, ET=1.89. Les autres sujets n'ont pas eu de préférence.

- Distance 10m

90% des sujets ont mentionné une préférence pour la condition expérimentale « Tracking ON » : moyenne=8.61, médiane=10, ET=2.41) et les 10% restants n'ont pas eu de préférence.

### **1.3.5. Adaptation comportementale**

Le comportement du conducteur a été analysé lors des quatre conditions expérimentales afin de détecter les différences et sa stratégie d'adaptation. Nous comparons notamment la vitesse perçue et l'adaptation de la position de la tête avec et sans correction de la PMC.

- **Réduction de la vitesse**

Nous avons constaté une tendance de réduction de vitesse lorsque la distance de projection des informations virtuelles est à 6m: 60 % des sujets ont mentionné une réduction de vitesse, qui se répartissent comme suit : 40% avec une faible réduction, 10% avec une moyenne réduction, et 10% avec une forte réduction. À 10m, 30 % des sujets ont rapporté une réduction de vitesse (20% avec une faible réduction et 10% avec une forte réduction). Cependant, le test statistique objectif n'a pas révélé de différence significative entre les conditions « Tracking ON » et « Tracking OFF ».

- **Adaptation de la position de la tête**

Les sujets ont rapporté une certaine stratégie d'adaptation des mouvements de la tête lors de la condition expérimentale « Tracking OFF ». À 6m, 70 % des sujets l'ont affirmé dans le questionnaire avec 20 % faible adaptation, 50% moyenne adaptation. À 10m, 60% des sujets ont mentionné ce comportement adaptatif (20 % faible adaptation, 30% moyenne adaptation et 10% forte adaptation). Lors de l'analyse objective, nous avons constaté des variations latérales des mouvements de tête, mais la différence entre les sessions avec les différentes conditions expérimentales ne se sont pas révélées significatives pour pouvoir conclure là-dessus.

## **1.4. Discussion**

L'impact de la PMC ainsi que la distance de projection ont été évalués dans le cadre de cette deuxième expérimentation. Les conditions de visibilité étaient en lumière du jour, ce qui fait que les marquages blancs réels étaient encore visibles. Pour ne pas avoir l'impression de dédoublement d'informations en journée (lorsqu'une partie ou la totalité du marquage est encore visible), il est important de les aligner correctement, car cela peut être une source de confusion et peut générer d'autres soucis perceptifs.

Les résultats montrent que la prise en compte de la PMC avec l'ATH-RA permet d'optimiser l'affichage des informations virtuelles et d'éviter de générer une gêne perceptive. La majorité des sujets ont mentionné une forte préférence pour la condition expérimentale « Tracking

ON » lorsque la distance de projection est de 6m (70% des sujets) et de 10m (90% des sujets). La précision de l’alignement pendant la correction de la PMC « Tracking ON » est significativement meilleure que lors de la condition « Tracking OFF ».

En ce qui concerne l’effet de la distance de projection sur l’impact de la PMC, il est communément admis que plus la distance de projection se rapproche de l’infini moins l’impact de la parallaxe de mouvement de l’observateur sera important (Andersson Hultgren, Blissing, & Jansson, 2012b). Cependant, notre résultat expérimental est contraire à celui attendu, puisque l’impact de la correction de la PMC à 10m était généralement plus important que l’impact de la correction de la PMC à 6m sur les paramètres mesurés. Cela nous conduit à conclure qu’il ne suffit pas d’aligner les informations correctement selon la position du conducteur pour que l’information soit précise et correctement perçue, mais il faut aussi avoir un alignement adéquat en profondeur entre le réel et le virtuel. En effet, 100% des sujets ont eu une préférence pour l’ATH-RA à 10m que ça soit en « Tracking ON » ou en « Tracking OFF ». Les raisons sont les suivantes : une meilleure présentation de l’image en profondeur, moins de scintillements liés au changement de profondeur, un meilleur confort visuel surtout pour les informations lointaines dans la scène de conduite et moins de confusion entre les marquages réels-virtuels. Quelques sujets ont mentionné des difficultés de focalisation et de fusion des images virtuelles à 6m, et ces difficultés sont accentuées avec la visualisation des informations lointaines (en allant vers l’horizon). Plus le regard du sujet est porté loin plus les difficultés de convergence deviennent importantes.

Dans l’étude suivante, nous souhaitons pousser l’analyse un peu plus loin en rajoutant un facteur supplémentaire à deux niveaux : condition de visibilité (bonne visibilité/ mauvaise visibilité). Nous souhaitons savoir si l’impact de la PMC avec un ATH-RA est perceptible de la même manière en fonction des conditions de visibilité et avec le changement de la distance de projection, et d’analyser la capacité de focalisation sur les informations RA durant les différentes conditions expérimentales. L’analyse est affinée en fonction de trois zones définies (proche, intermédiaire, et lointaine), à cause des difficultés de convergence constatées précédemment.

## **2. Impact de la PMC, la distance de projection et la condition de visibilité avec un ATH-RA virtuel**

### **2.1. Objectif**

Nous examinons dans cette expérimentation l’ATH-RA selon trois paramètres expérimentaux : la PMC, la distance de projection des informations RA, et les conditions

de visibilité. Huit conditions expérimentales ont été évaluées et comparées par les participants.

## 2.2. Méthode

### 2.2.1. Plan expérimental

Nous avons d'abord établi les différentes configurations, avec trois facteurs à deux niveaux chacun, comme indiqué dans le Tableau 6.1 ci-dessous.

Tableau 6.1 Définition des différentes configurations

	Visibilité	Distance	Tracking ATH-RA
<i>Config 1</i>	BV	10	ON
<i>Config 2</i>	MV	10	ON
<i>Config 3</i>	BV	6	ON
<i>Config 4</i>	MV	6	ON
<i>Config 5</i>	BV	10	OFF
<i>Config 6</i>	MV	10	OFF
<i>Config 7</i>	BV	6	OFF
<i>Config 8</i>	MV	6	OFF

Nous avons opté pour un plan expérimental complet, où chaque sujet se soumet à toutes les conditions définies précédemment, pour éliminer l'effet de la variabilité inter-sujet à cause du nombre limité de participants. Cependant, un modèle de mesures contrebalancées est nécessaire pour neutraliser l'effet de l'ordre de passage des configurations. Nous avons utilisé la méthode du carré latin pour attribuer un ordre de passage prédéterminé des configurations pour chaque sujet, et limiter ainsi l'effet d'apprentissage (cf. Tableau 6.2).

Tableau 6.2 Ordre de passage des configurations « VDP »

<i>Sujets</i>	<i>Configurations</i>							
<i>Sujet 1</i>	Config 1	Config 2	Config 8	Config 3	Config 7	Config 4	Config 6	Config 5
<i>Sujet 2</i>	Config 2	Config 3	Config 1	Config 4	Config 8	Config 1	Config 7	Config 6
<i>Sujet 3</i>	Config 3	Config 4	Config 2	Config 5	Config 1	Config 2	Config 8	Config 7
<i>Sujet 4</i>	Config 4	Config 5	Config 3	Config 6	Config 2	Config 3	Config 1	Config 8
<i>Sujet 5</i>	Config 5	Config 6	Config 4	Config 7	Config 3	Config 4	Config 2	Config 1



<i>Sujet 6</i>	Config 6	Config 7	Config 5	Config 8	Config 4	Config 5	Config 3	Config 2
<i>Sujet 7</i>	Config 7	Config 8	Config 6	Config 1	Config 5	Config 6	Config 4	Config 3
<i>Sujet 8</i>	Config 8	Config 1	Config 7	Config 2	Config 6	Config 7	Config 5	Config 4

### 2.2.2. Simulation d'un ATH-RA

L'ATH-RA est simulé de la même manière que dans l'expérimentation précédente: la métaphore virtuelle consiste à augmenter les lignes de marquage au sol pour l'assistance au maintien de la voie, et le simulateur de conduite CCARDs de Renault est utilisé pour mener cette expérimentation (cf. 1.2.1).

### 2.2.3. Scénario de conduite

La scénarisation est similaire à l'expérience précédente, sauf pour les conditions de visibilité qui ne sont pas fixes dans cette expérimentation. Le parcours de conduite se compose d'un milieu urbain avec des lignes droites et des virages. Une partie de ce parcours indique une limitation de vitesse à 70km/h et l'autre à 90km/h (cf. Figure 6.8). Le scénario a été conçu de manière à reproduire exactement les mêmes conditions de circulation durant les huit sessions de conduite, afin de garantir la cohérence des résultats expérimentaux. L'itinéraire est indiqué par un GPS vocal sans images pour éviter les interférences avec les informations RA. Le trafic est peu dense pour ne pas trop perturber l'attention du conducteur, et l'inciter à se concentrer sur le maintien de sa trajectoire.

Le parcours est exactement le même pour chaque configuration afin d'éviter tout autre effet parasite que l'on ne peut pas contrôler. L'idée c'est d'essayer de maintenir ces variables parasites à un niveau constant afin de limiter leur influence sur les résultats expérimentaux.



*Figure 6.8 Parcours de conduite*

#### **2.2.4. Procédure**

Les participants ont été invités à réaliser d'abord une phase de familiarisation, avant d'entamer la phase expérimentale, qui se compose de huit sessions de conduite d'environ six minutes chacune. Après chaque session de conduite, les participants ont répondu à un petit questionnaire pour évaluer les différents paramètres : la capacité de mise au point, la netteté de la RA, la facilité de changement de la direction de regard RA-réel et inversement, la fréquence des images double, la facilité d'adaptation, la distinction des marquages au sol, la précision de l'alignement RA-réel, la pertinence de l'aide et enfin la maîtrise de la trajectoire. Les réponses sont évaluées dans les trois zones indiquées ci-dessous : zone proche 1, zone intermédiaire 2, et zone lointaine 3 (cf. Figure 6.9).

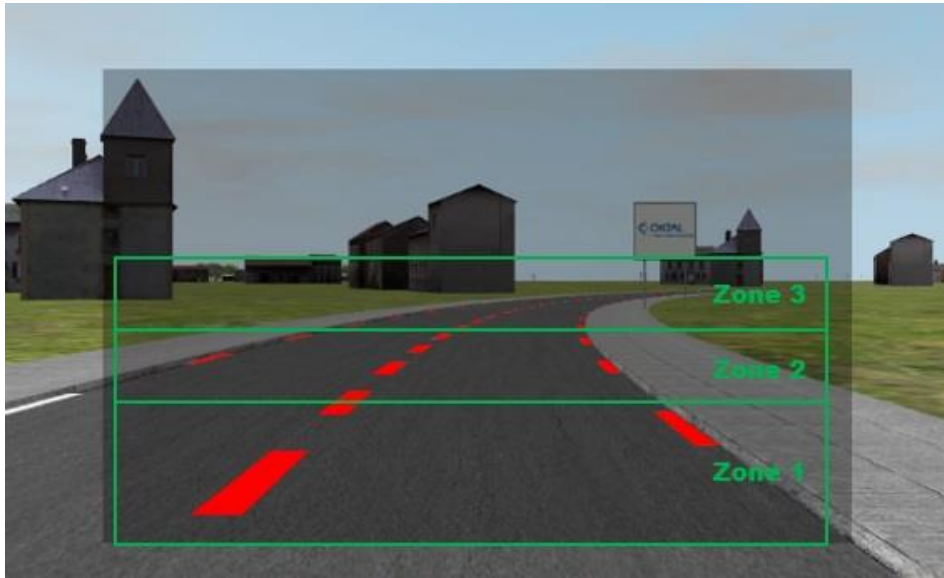


Figure 6.9 Les trois zones d'affichage ATH-RA à évaluer

## 2.2.5. Variables indépendantes et variables dépendantes

### Les variables indépendantes

Trois facteurs, à deux niveaux, ont été introduits dans le cadre de cette expérimentation : « La Parallaxe de Mouvement Conducteur –PMC (Tracking ON/Tracking OFF)», « La distance de projection (Distance 6m/Distance 10m) », et « Les conditions de visibilité de la route (Bonne Visibilité/ Mauvaise Visibilité) ». Ce qui fait un total de huit conditions expérimentales avec toutes les combinaisons :

- Tracking ON & Distance 6m & Bonne Visibilité
- Tracking ON & Distance 10m & Bonne Visibilité
- Tracking OFF & Distance 6m & Bonne Visibilité
- Tracking OFF & Distance 10m & Bonne Visibilité
- Tracking ON & Distance 6m & Mauvaise Visibilité
- Tracking ON & Distance 10m & Mauvaise Visibilité
- Tracking OFF & Distance 6m & Mauvaise Visibilité
- Tracking OFF & Distance 10m & Mauvaise Visibilité

} (Figure 6.10)

} (Figure 6.11)

} (Figure 6.12)

} (Figure 6.13)



*Figure 6.10 Tracking ON & BV*



*Figure 6.11 Tracking OFF & BV*



*Figure 6.12 Tracking ON & MV*



*Figure 6.13 Tracking OFF & MV*

## Les variables dépendantes

Nous allons évaluer la perception des sujets durant les huit conditions expérimentales (citées précédemment) selon les critères ci-dessous, qui caractérisent globalement le confort visuel de l'ATH-RA :

- La facilité de focalisation
- La netteté des marquages RA
- La facilité de changement du regard
- L'absence d'images doubles
- L'adaptation à l'ATH-RA
- La facilité d'association entre les images virtuelles et l'environnement réel
- La précision de l'alignement des informations virtuelles avec les informations réelles correspondantes

Nous avons également demandé au sujet d'évaluer la pertinence de l'aide fournie avec l'ATH-RA ainsi que l'estimation de la maîtrise de la trajectoire.

## Participants

Huit participants experts (age entre 23 ans et 51 ans) du centre de la Réalité Virtuelle chez Renault ont participé à cette expérimentation, sans connaître les différents facteurs expérimentaux. Ils ont tous une bonne acuité visuelle (naturelle ou bien avec des corrections ophtalmiques), et étaient capables de percevoir les images 3D. Nous avons effectué nos mesures durant les huit conditions expérimentales sur les mêmes sujets, c'est pourquoi nous avons opté pour le test de Friedman, qui est un test non-paramétrique à mesures répétées sur k échantillons appariés (cf. Chapitre 4 .5.3 ).

### 2.3. Résultat

Il a été demandé aux sujets d'évaluer quelques paramètres pour les différentes conditions expérimentales après le parcours de conduite associé. Une échelle sur 10 points a été utilisée de : pas du tout=0, à très élevée=10. Les valeurs moyennes sont représentées sur les figures ci-dessous avec un niveau de confiance à 95%. Les résultats des tests statistiques sont indiqués lorsque les différences sont significatives ( $p < 0.05$ ).

#### 2.3.1. Capacité de mise au point

Il a été demandé aux sujets d'estimer la facilité de mise au point pendant les différentes conditions expérimentales. Une échelle sur 10 points a été utilisée de : pas du tout=0, à très élevée=10. Les valeurs moyennes sont représentées sur la Figure 6.14 ci-dessous avec un niveau de confiance à 95%.

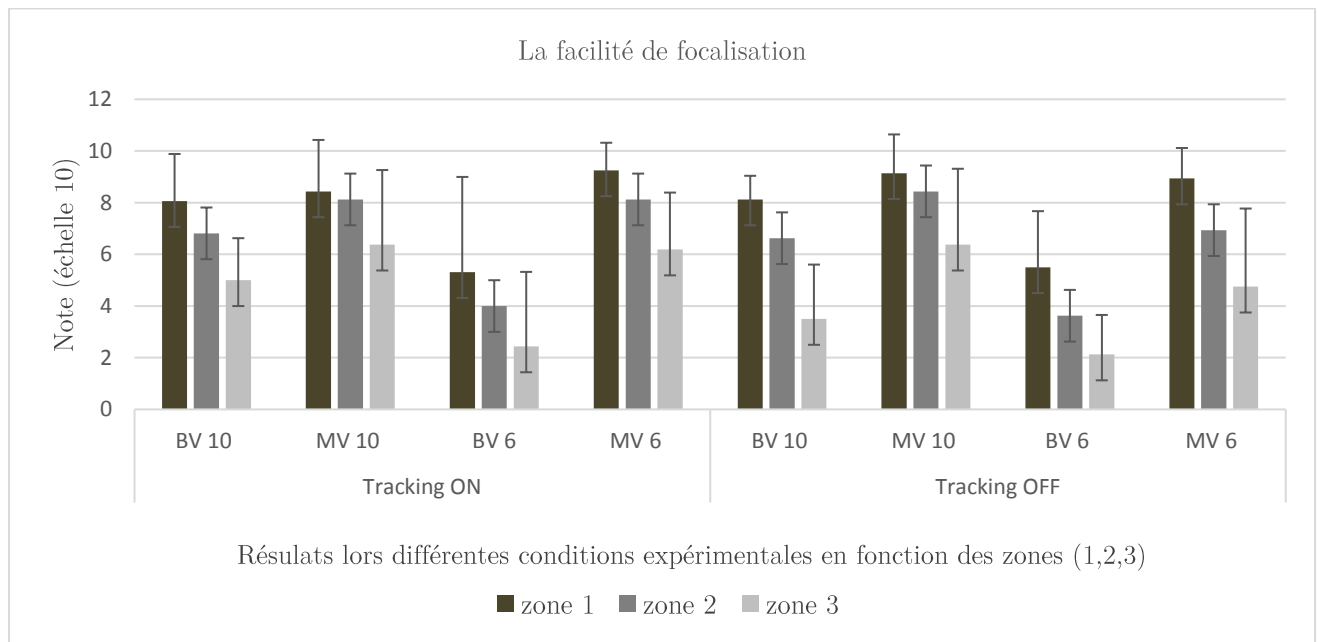


Figure 6.14. Évaluation de la capacité de focalisation des sujets

Dans la Figure 6.14 précédente, les résultats montrent que dans de bonnes conditions de visibilité, la capacité de focalisation est meilleure lorsque la distance de projection est à 10m (comparativement à la distance de 6m). Cet écart de la capacité de focalisation est beaucoup moins important lorsque la condition de visibilité est mauvaise.

Le test de Friedman a révélé une différence significative entre les conditions expérimentales. **Zone 1** :  $p=0.0001316$ ,  $Q_0=29.225$ ,  $Q_c=14.067$ ,  $ddl=7$ ,  $alpha=0.05$  / **Zone 2** :  $p=0.001$ ,  $Q_0=29.225$ ,  $Q_c=14.067$ ,  $ddl=7$ ,  $alpha=0.05$  / **Zone 3** :  $p=0.001$ ,  $Q_0=25.968$ ,  $Q_c=14.067$ ,  $ddl=7$ ,  $alpha=0.05$ . Suivant la méthode de Nemenyi, des comparaisons multiples par paires ont été réalisées pour détecter toutes les différences significatives. Nous mentionnons ici ces différences avec la variation d'un seul paramètre : *Tracking ON-BV-6 vs. Tracking ON-MV-6* avec  $p=0.039$ , *Tracking OFF-BV-6 vs. Tracking OFF-MV-6* avec  $p=0.02$ .

### 2.3.2. La netteté de la RA

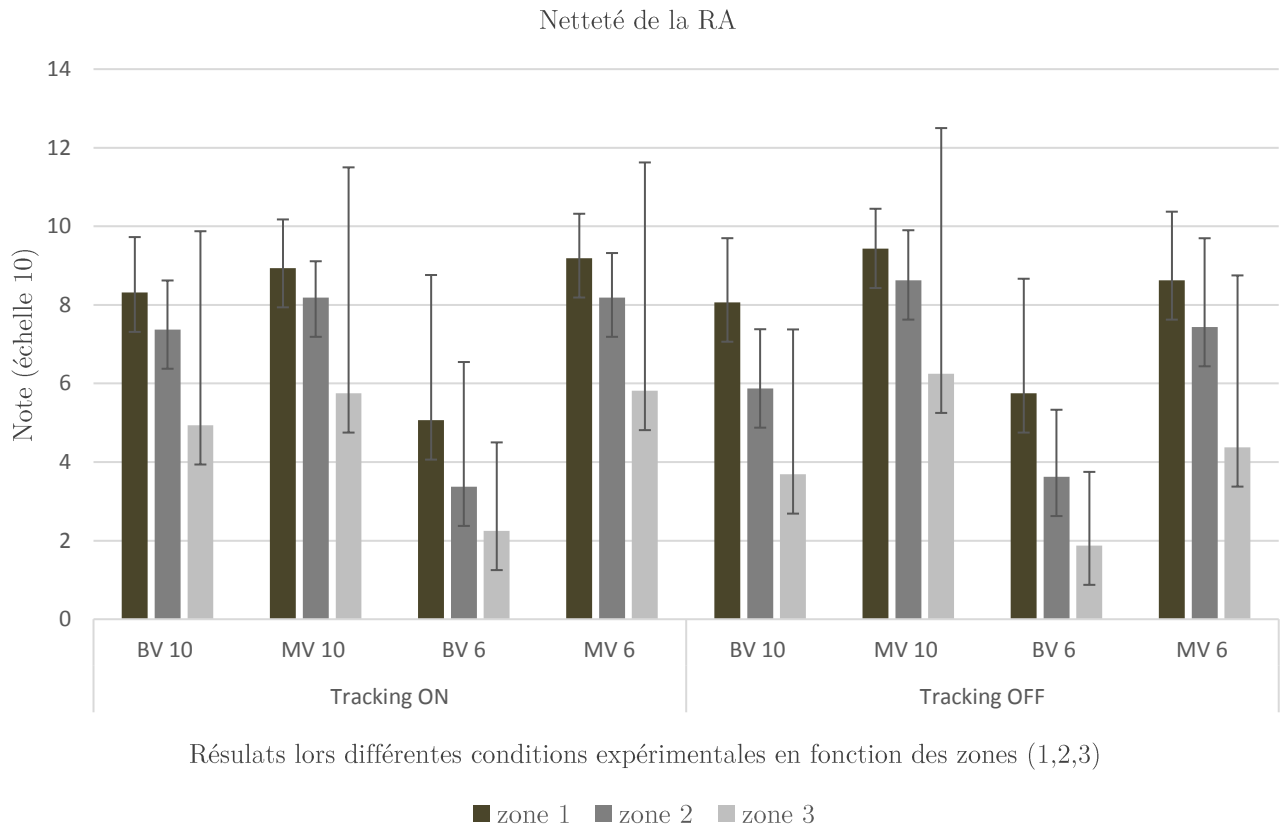


Figure 6.15. Évaluation de la netteté des marquages RA

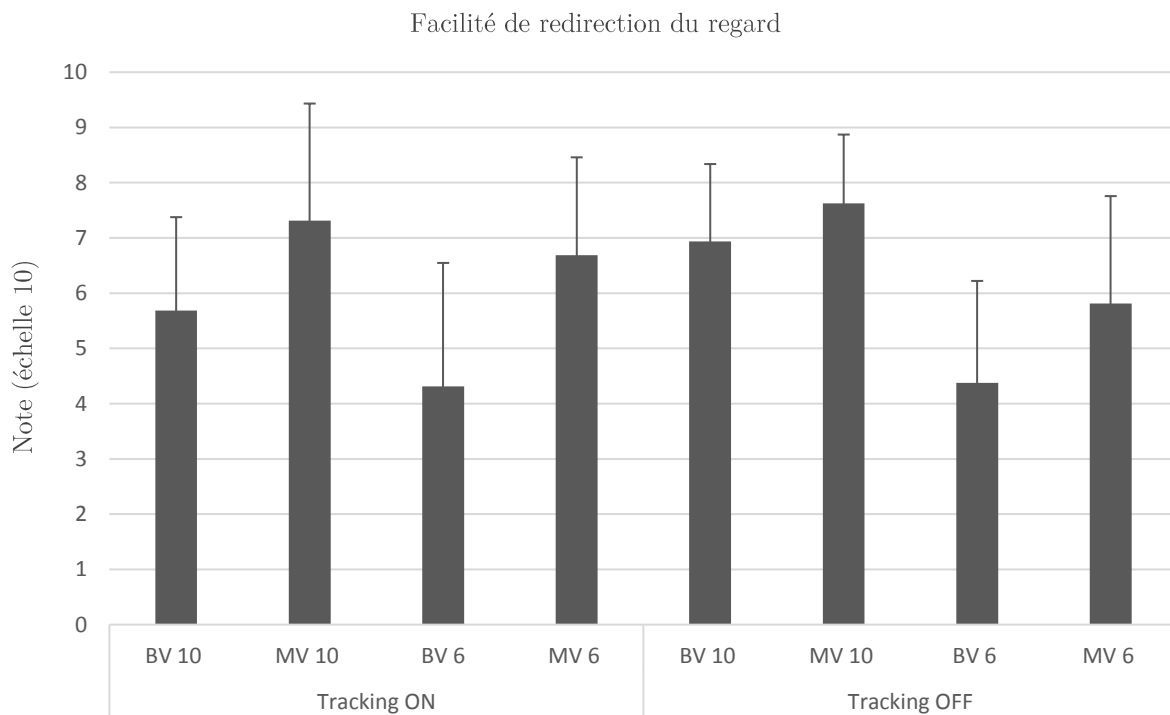
Nous constatons dans la Figure 6.15 précédente, que d'une manière générale la moyenne de la netteté de la RA est meilleure en visibilité réduite pour les deux distances de projection.

La différence entre ces moyennes est néanmoins plus prononcée pour la distance de projection à 6m.

L'application du test statistique non-paramétrique de Friedman dans les différentes zones a révélé un  $p < 0.05$ . Cependant, les différences ne sont significatives que lors de la variation de deux ou trois paramètres. Des études supplémentaires sont nécessaires pour conclure sur la netteté des informations RA en fonction des conditions expérimentales.

### 2.3.3. Facilité du changement de la direction du regard

Il a été demandé aux sujets d'évaluer la capacité de changement de la direction du regard entre les informations RA présentées sur l'ATH-virtuel et les informations de la scène de conduite projetées sur l'écran CAVE. Dans notre cas expérimental, seul les plans de convergence peuvent être différents entre l'ATH-RA et les informations de la scène de conduite. Cependant, dans le cas d'une conduite réelle, le plan d'accommodation peut aussi varier, ce qui peut également impacter la facilité du changement de la direction du regard (car nécessité de ré-accommoder en fonction de la distance). Il faut donc rester prudent quant à l'interprétation de ce résultat expérimental.



Résultats lors différentes conditions expérimentales

Figure 6.16. Évaluation de la facilité de changement de la direction du regard

Dans la Figure 6.16 précédente, nous constatons une légère différence entre les moyennes de la facilité de redirection du regard évaluée par les sujets, avec des notes supérieures pour la distance de projection à 10 mètres (pour les cas : Tracking ON, Tracking OFF, bonne visibilité et mauvaise visibilité). Lors de l'application des tests statistiques, il n'y a pas de différence significative pour la facilité de redirection du regard lors de la variation d'un seul paramètre expérimental.

### 2.3.4. Fréquence des images doubles

Nous avons demandé aux sujets d'indiquer la fréquence de perception des images doubles dans les différentes zones définies (zone proche 1, zone intermédiaire 2, zone lointaine 3). C'est pour évaluer la capacité de perception des images stéréoscopiques et de détecter s'il y a des cas où la fusion des images est la plus facile.

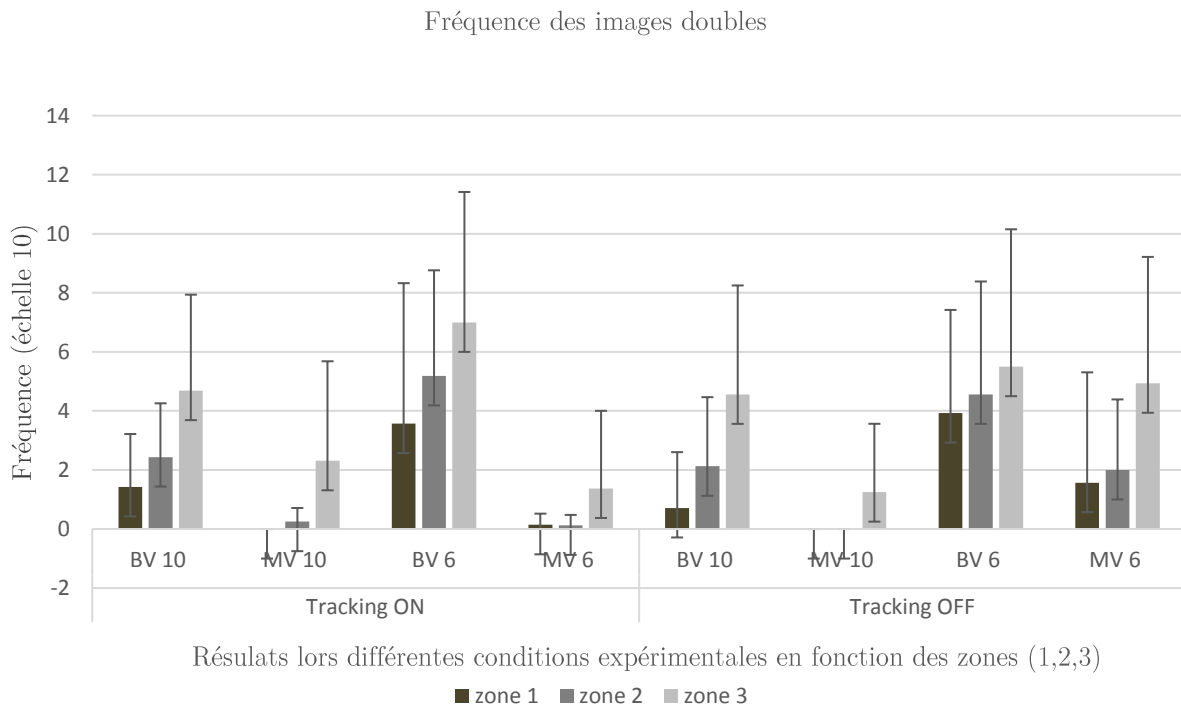
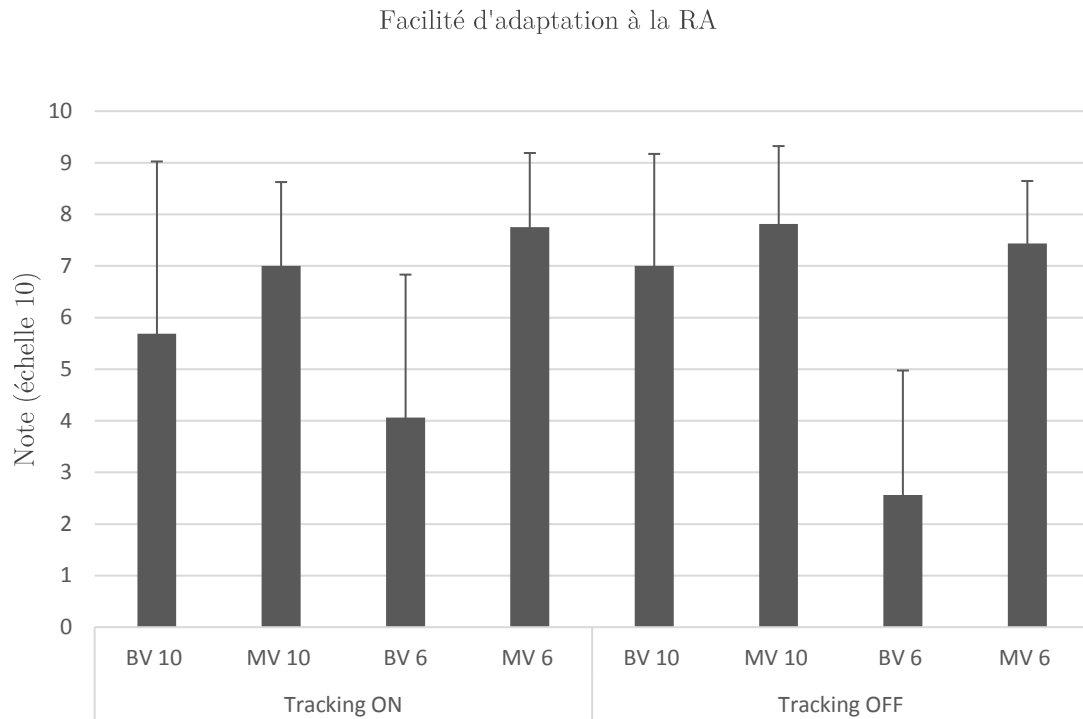


Figure 6.17. Évaluation de la fréquence d'apparition des images doubles

D'après la Figure 6.17 précédente, nous pouvons constater que les images doubles sont moins présentes lorsque les conditions de visibilité de la route sont mauvaises. Lorsqu'on compare les moyennes des images doubles en fonction de la distance de projection, nous constatons qu'elles sont plus élevées lorsque de la distance de projection est plus proche de 6m. Cependant, les tests statistiques n'ont pas permis de confirmer d'une manière significative ces résultats.



### 2.3.5. Facilité d'adaptation à la RA

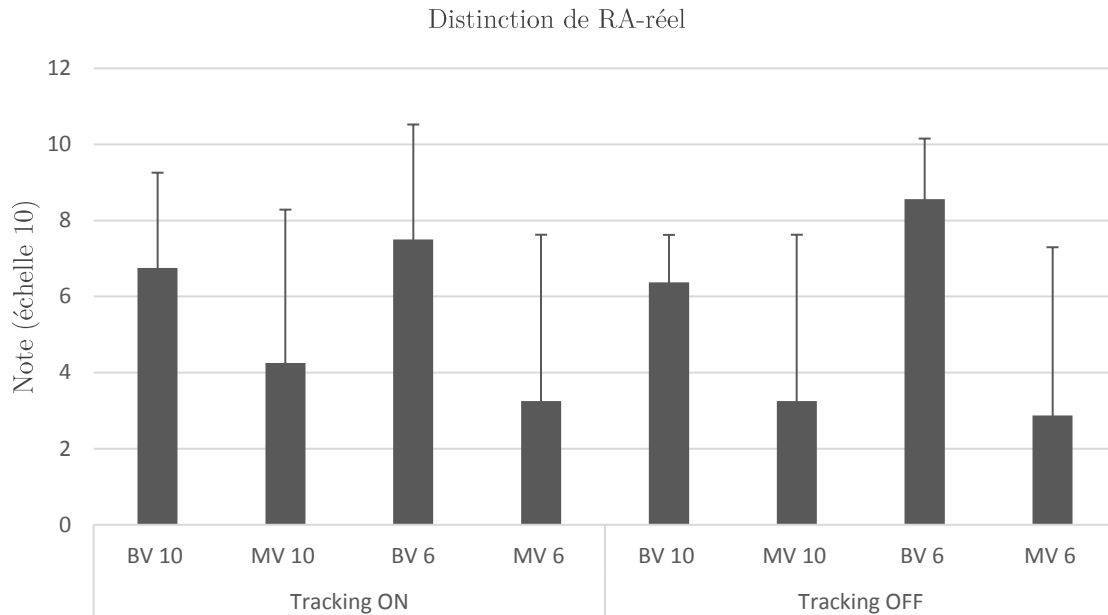


Résultats lors différentes conditions expérimentales

*Figure 6.18. Évaluation de la capacité d'adaptation à l'ATH-RA*

Le degré selon lequel les sujets se sont adaptés à l'ATH-RA a été évalué durant les huit conditions expérimentales (cf. Figure 6.18). Nous relevons des notes légèrement supérieures lorsque les conditions de visibilité de la route sont faibles (MV) et lorsque la distance de projection est à 10m (comparativement aux bonnes conditions de visibilité et lorsque la distance de projection est de 6m respectivement). Les variations sont cependant faibles, et les tests statistiques n'ont pas révélé de différences significatives entre les différentes conditions expérimentales.

### 2.3.6. Distinction des marquages au sol



Résultats lors différentes conditions expérimentales

*Figure 6.19. Évaluation de la capacité de distinction des marquages au sol réel des marquages en RA sur l'ATH*

Les sujets ont évalué leur capacité à distinguer les vrais marquages au sol blancs, et des marquages RA enrouge (cf. Figure 6.19). Lorsque les sujets ne distinguent pas ces deux marquages, c'est qu'ils sont parfaitement superposés. Plus les sujets arrivent à voir les marquages réels, moins les informations RA sont alignées. Nous pouvons relever une distinction importante pour une distance de projection à 6m lorsque la visibilité de la route est bonne. Lorsque la visibilité de la route est mauvaise, les marquages au sol réels en blanc sont moins visibles et il devient difficile de les discerner derrière la RA. Les tests statistiques réalisés n'ont pas permis de conclure sur la significativité des résultats.

### 2.3.7. Précision de l'alignement de l'ATH-RA

Après chaque parcours de conduite correspondant à une condition expérimentale, les sujets ont évalué la précision de l'alignement des informations (marquages au sol RA) avec les éléments présents dans la scène de conduite, et ce dans les trois zones définies : zone proche 1, zone intermédiaire 2, et la zone lointaine 3.

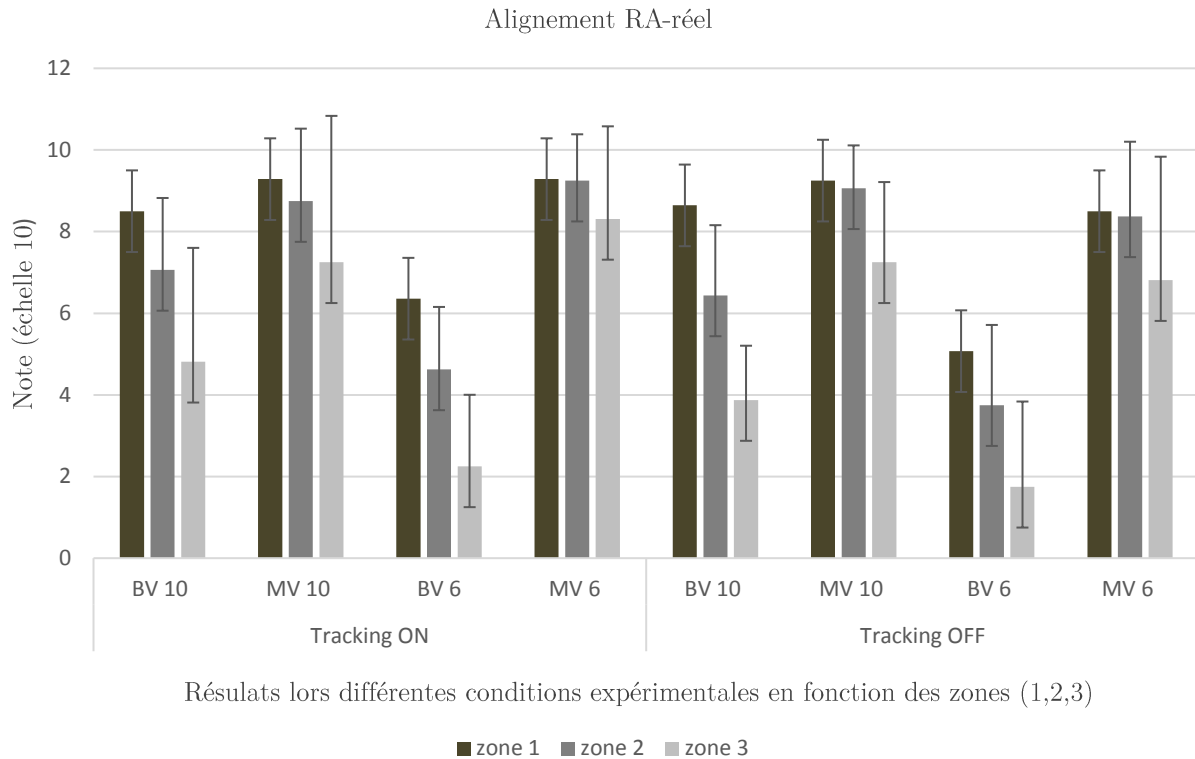


Figure 6.20. Évaluation de la précision de l'alignement entre la RA et l'information de la scène de conduite

Selon les résultats présentés sur la Figure 6.20, on constate qu'en condition de bonne visibilité la précision de l'alignement est meilleure lorsque la distance de projection est de 10m (par rapport à la distance à 6m). Tandis, que lorsque la visibilité de la route est mauvaise la précision de l'alignement est quasi-équivalente pendant les deux distances de projection à 6m et à 10m.

Le test de Fiedman a révélé une différence significative entre les conditions expérimentales avec un  $p < 0.0001$  dans les trois zones (zone proche 1, zone intermédiaire 2, zone lointaine 3). Des comparaisons multiples par paires suivant la méthode de Nemenyi ont été réalisées pour détecter toutes les différences significatives. Nous mentionnons ici ces différences avec la variation d'un seul paramètre : *Tracking ON-BV-6* vs. *Tracking ON-MV-6* avec  $p = 0.002$  (mêmes résultats obtenus pour les trois zones).

### 2.3.8. Pertinence de l'aide RA

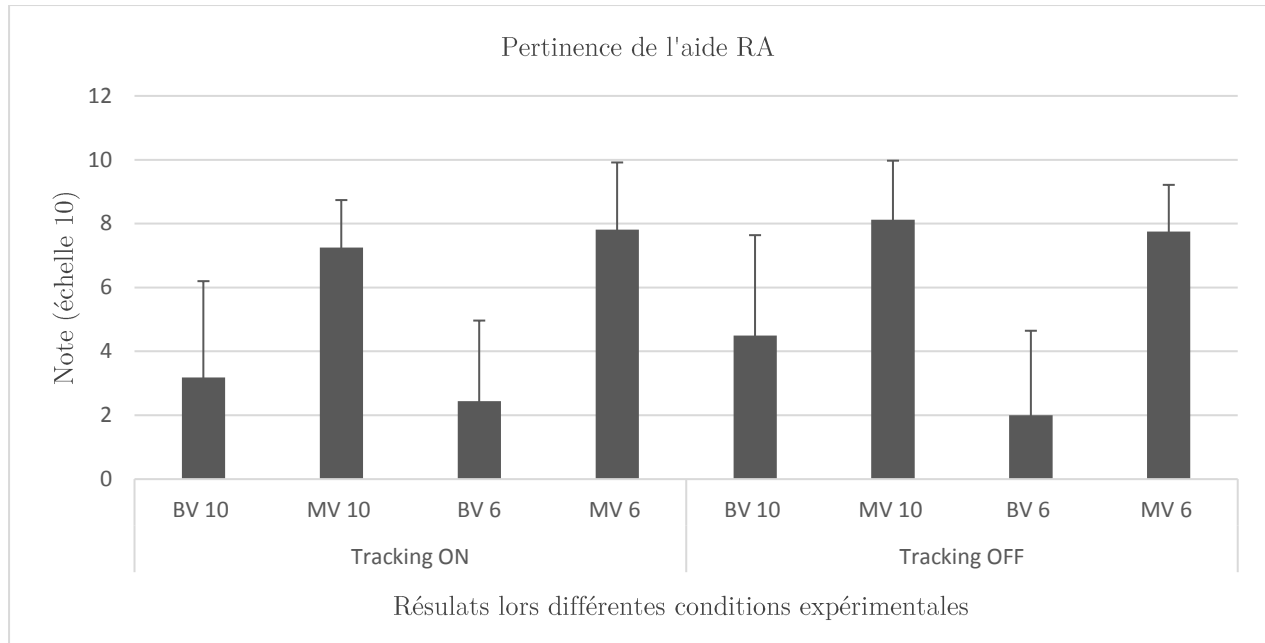


Figure 6.21. Évaluation de la pertinence de l'aide durant les différentes conditions expérimentales

Les sujets ont estimé la pertinence de l'aide fournie avec les informations RA, après chaque parcours correspondant à une condition expérimentale (cf. Figure 6.21). Nous remarquons que dans les conditions de mauvaise visibilité, les moyennes de la pertinence de l'aide RA sont largement supérieures à celles obtenues lors de la condition de bonne visibilité, et ce pour les deux distances de projection (en particulier pour la distance à 6m).

Le test de Friedman a révélé une différence significative entre les conditions expérimentales avec un  $p < 0.001$ ,  $Q_0 = 42.038$ ,  $Q_c = 14.067$ ,  $ddl = 7$ ,  $alpha = 0.05$ . Des comparaisons multiples par paires suivant la méthode de Nemenyi ont été réalisées pour détecter toutes les différences significatives. Nous mentionnons ici les différences avec la variation d'un seul paramètre : *Tracking ON-BV-6 vs. Tracking ON-MV-6* avec  $p = 0.012$  / *Tracking OFF-BV-6 vs. Tracking OFF-MV-6* avec  $p = 0.012$ .

### 2.3.9. Capacité de maîtrise de la trajectoire

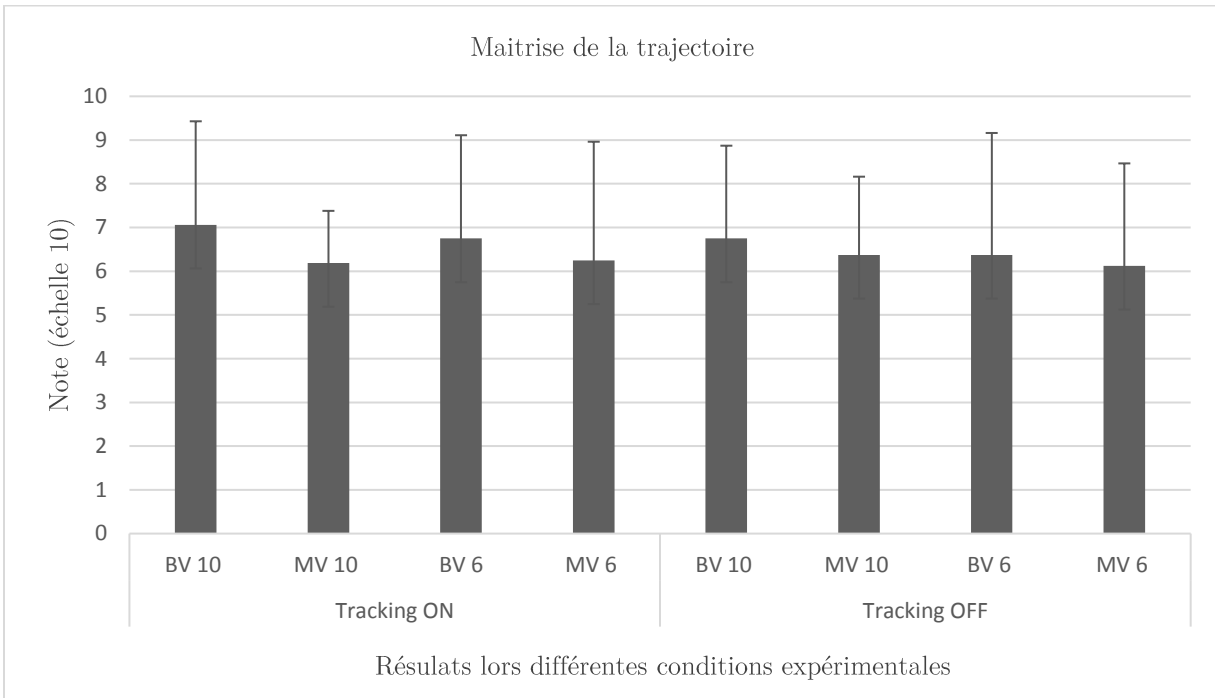


Figure 6.22. Évaluation de la capacité de maitrise de la trajectoire du véhicule

Le degré de maitrise de la trajectoire du véhicule a été estimé par les sujets pour les huit conditions expérimentales définies (Figure 6.22). Les variations entre les différentes conditions expérimentales ne se sont pas révélées significatives.

## 2.4. Discussion

La différence entre la capacité de mise point s'est révélée significative entre les conditions expérimentales. Les sujets trouvent qu'il est plus facile de focaliser sur les informations RA en visibilité réduite que lorsque la visibilité de la route est bonne. Lorsque les marquages au sol réels sont moins visibles, ils attirent moins l'attention du conducteur et interfèrent moins avec les informations virtuelles. Ce qui peut avoir un impact également sur la netteté des informations perçues. Nous avons constaté une légère facilité du changement de la direction de regard entre la RA et la route lorsque la distance de projection est fixée à 10m. Ce paramètre peut indiquer le niveau de confort visuel lorsque le conducteur permute son regard entre la route et l'interface RA. Cependant, l'étude statistique ne s'est pas révélée significative, vraisemblablement à cause du conflit convergence-accommodation, présent dans l'environnement de simulation virtuelle qu'on ne peut pas maitriser. En ce qui concerne les images doubles, les tendances ont révélé qu'elles sont moins fréquentes en condition de visibilité réduite, surtout lorsque la distance de projection est de 10m. Ce paramètre permet d'indiquer la facilité de fusion des informations virtuelles, car, moins les images doubles sont présentes plus la capacité de fusion est importante.

La capacité d'adaptation peut également indiquer le niveau de confort visuel des sujets selon les conditions expérimentales (moins la capacité d'adaptation est importante moins le sujet tolère l'ATH-RA). Les sujets indiquent en moyenne une bonne capacité d'adaptation à la RA lorsque la distance de projection est à 10m en BV et MV. Par contre à 6m les sujets indiquent en moyenne une capacité d'adaptation supérieure en MV (vs. BV). La prise en compte de la PMC n'a pas eu d'influence sur l'adaptation à la RA. Conformément à nos attentes, les sujets distinguent moins les marquages RA des marquages réels en MV, ce qui peut contribuer à une meilleure adaptation RA (donc moins de risque de confusion). Toutefois, on ne constate pas de différence significative à ce niveau en ce qui concerne l'impact de la PMC. Probablement parce que les marquages réels restent perceptibles dans tous les cas.

L'alignement en profondeur est meilleur à une distance de projection à 10m par rapport à celle de 6m. On constate également que l'alignement n'est pas discerné de la même manière en condition de BV et MV surtout pour la distance à 6m. La précision de l'alignement est beaucoup plus importante à 6m en MV qu'à 6m en BV. Ce résultat peut être expliqué par ce qui a été vu précédemment concernant une meilleure capacité de focalisation à 6m en visibilité réduite. L'hypothèse littéraire qui peut expliquer ce résultat concerne la myopisation nocturne et le rapprochement de la distance d'accommodation lors de la conduite en visibilité réduite (Knoll, 1952; O. W. Richards, 1967).

Les sujets ont jugé que l'aide fournie avec la RA est beaucoup plus pertinente en MV. Ce résultat est cohérent avec le résultat précédent, puisque les marquages au sol réels sont moins distingués en MV. Notre résultat confirme celui obtenu par Charissis et ses collaborateurs (Charissis & Naef, 2007).

En ce qui concerne le niveau de maîtrise de la trajectoire, les sujets ont estimé une bonne maîtrise dans toutes les conditions expérimentales. Ce qui est probablement vrai, car en plus des marquages au sol qui restent visibles même en MV, d'autres indices sont utilisés pour guider la trajectoire du véhicule : les bords de la route, le flux visuel et l'indice de la parallaxe de mouvement avec le mouvement du véhicule et celui des objets environnants.



## Conclusion générale et perspectives

Pour satisfaire les besoins du conducteur, tout en assurant sa sécurité, l'industrie automobile s'inspire directement du domaine de l'aéronautique et s'intéresse à l'intégration des systèmes d'Affichage Tête Haute (ATH) pour présenter des informations directement dans son champ de vision. En utilisant cette technique, une aide visuelle peut être fournie à tout moment au conducteur sans quitter la route des yeux. Par ailleurs, les avancées technologiques en Réalité Augmentée (RA) et en optique permettent d'envisager l'affichage des informations virtuelles en profondeur (collimation optique) pour faciliter le processus d'accommodation avec le changement de la direction du regard. Un ATH-RA peut agir comme un système ADAS informatif et préventif car il permet d'augmenter la perception visuelle du conducteur et peut le guider dans l'ensemble de son activité de conduite, et voire même améliorer ses performances de conduite. Cependant, avant d'introduire ces progrès technologiques pour l'aide à la conduite, il faudra tester l'applicabilité dans différentes situations de conduite et éviter ainsi d'engendrer des gênes visuelles ou d'autres problèmes perceptifs.

Les travaux présentés dans le manuscrit s'inscrivent dans le cadre d'un projet CIFRE, destiné en premier lieu à la validation d'un système ATH-RA dans un environnement virtuel. La particularité de ces travaux de recherche réside dans leur caractère multidisciplinaire. Ils font appel à maintes compétences en : Réalité Augmentée pour l'aide avancée à la conduite, méthodologie ergonomique et facteurs humains, simulation de conduite automobile, et physiologie de la perception visuelle. Ces principes ont été étudiés dans ce manuscrit et ont été utilisés pour mettre en place une nouvelle méthode expérimentale destinée à tester un ATH-RA. Nous avons montré dans ce travail qu'il est possible de faire des essais dans un environnement virtuel d'un ATH-RA permettant de tester plusieurs paramètres. Cela peut s'avérer plus compliqué à réaliser dans le cadre d'un ATH-RA réel. Nous avons testé l'implémentation avec des sujets réels, qui ont conduit un simulateur de conduite dans un environnement virtuel immersif (intégrant l'ATH-RA avec la scène de conduite). Nous avons identifié des paramètres majeurs pour la bonne perception des informations RA, puis nous les avons évalués avec des études subjectives et objectives.

### Conclusion sur certains résultats obtenus

La stratégie d'adaptation d'une position fixe lors de l'utilisation d'un ATH-RA sans correction de la PMC, ne s'est pas confirmée durant nos expérimentations. Quelques tendances ont été observées durant la réalisation des tâches complémentaires et durant les dépassements lors de la première expérimentation, mais ces résultats étaient insuffisants pour confirmer cette hypothèse et en faire une généralisation.



L'hypothèse de la génération de la PMC s'est confirmée dans toutes les expérimentations et durant toutes les conditions de conduite.

Les résultats subjectifs confirment la nécessité de prendre en compte la PMC lors de l'utilisation d'un ATH-RA, puisque le confort visuel était globalement meilleur. Cependant, l'analyse objective réalisée ne montre pas de modification majeure dans le comportement et les performances de conduite en fonction de la correction de la PMC. En effet, certains indicateurs de confort (communément utilisé dans la littérature) n'ont pas révélé de résultats significatifs dans notre étude. Deux hypothèses peuvent expliquer ce résultat :

- La correction de la PMC n'a pas d'influence sur le comportement et sur les performances de conduite
- Les conditions expérimentales ne sont pas suffisamment adaptées pour observer des résultats objectifs. Nous pouvons citer les raisons suivantes :
  - Le nombre de sujets est insuffisant : il existe une forte variation inter-sujet lorsqu'on réalise une expérimentation dans un environnement virtuel et avec un simulateur de conduite. La solution pour pallier à cette variation est de faire plusieurs catégories de sujets, soit en fonction de l'âge, des caractéristiques visuelles, ou du type de conduite (nerveuse, calme, normale)
  - Le temps des parcours de conduite était très court : le temps des sessions de conduite était limité volontairement pour réduire le risque d'apparition du mal du simulateur, ce qui a peut-être favorisé un effet d'apprentissage. En effet, il se peut que la durée de conduite ne soit pas suffisamment longue pour pouvoir comparer les données de conduite et observer une différence significative.
  - L'influence d'autres facteurs : elle peut être liée à la simulation de conduite et environnement virtuel comme l'altération physiologique due au conflit accommodation-vergence dans l'environnement virtuel, la sensibilité au mal du simulateur, acuité stéréoscopique des participants...

Dans la deuxième expérimentation, nous avons analysé l'impact de la PMC et de la distance de projection (6m et 10m), en fixant la condition de visibilité (visibilité de jour). La mise à jour de l'ATH-RA en fonction de la position de la tête permet d'optimiser l'affichage et l'alignement RA, et la distance de projection la plus adaptée selon les sujets est à 10m. Nous avons également relevé que la précision de l'alignement est meilleure à 10m par rapport à la distance de 6m même lorsque la PMC n'est pas prise en compte par l'ATH-RA (condition Tracking OFF). Par ailleurs, une meilleure facilité de mise au point à 10m a été constatée par rapport à celle 6m.

Dans la troisième expérimentation, nous avons introduit un nouveau paramètre qui concerne la condition de visibilité (bonne visibilité et mauvaise visibilité). Nous pouvons conclure que

la condition expérimentale la plus confortable visuellement pour les sujets est « Tracking ON & Distance 10m & Mauvaise Visibilité ». L'impact de la correction de la PMC est seulement visible pour les sujets lorsque les conditions de visibilité sont bonnes. Cela n'a pas eu d'impact sur la maîtrise de la trajectoire du véhicule par les sujets, probablement parce qu'ils ont utilisé d'autres indices présents dans l'environnement. Nous avons également relevé pendant cette expérimentation une facilité de focalisation à 6m en MV, ce qui n'était pas le cas en BV. Nous avons fait le rapprochement avec des études dans la littérature qui confirment l'existence d'une myopisation nocturne qui a comme effet le rapprochement de la distance d'accommodation.

## Validité des résultats

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour parler de la validité des résultats expérimentaux. Il faut être prudent sur l'interprétation de ces résultats à cause des différences entre une conduite réelle et une conduite dans un environnement de simulation virtuelle, qui peuvent être d'ordre physique, expérientiel, éthologique et psychologique (Malaterre & Fréchaux, 2001). De ce fait, il est important de comprendre les causes de ces altérations, afin d'anticiper leurs effets et en limiter les conséquences. L'expérimentation se déroule dans un environnement purement virtuel et ceci nous amène à nous interroger sur la fidélité des stimuli, sur le rapprochement de la perception réelle (visuelle et vestibulaire), sur l'analogie des comportements, et enfin si les mêmes coûts cognitifs sont induits pour la réalisation des différentes tâches (Lobjois, 2016).

Dans le cas de l'utilisation d'un ATH-RA dans un environnement réel, les facteurs cités précédemment peuvent compromettre la portabilité des résultats. De plus, le conflit physiologique engendré par la simulation d'un ATH-RA virtuel est encore plus complexe. En effet le conflit visuel accommodation-convergence est connu dans les milieux virtuels. Lors de la visualisation des objets environnants en vision naturelle, la distance d'accommodation coïncide avec la distance de convergence (correspondante à l'angle de convergence des deux yeux). Ce qui n'est pas toujours le cas lors de l'utilisation d'un ATH-RA. Dans une simulation virtuelle, le conducteur fait sa mise au point sur l'écran réel utilisé pour la projection d'informations RA (cf. Figure, cas 1). Dans le cas d'un ATH réel, c'est la distance de projection rendue possible par un système optique adéquat, qui permet une collimation assez proche de l'infini optique (infini optique  $>6m$ ). L'accommodation sur la RA est généralement maintenue à une distance fixe, tandis que la scène de conduite est riche en objets proches et lointains, ceci qui entraîne aussi une variation de l'angle de convergence de l'œil de l'utilisateur (cf. Figure cg.1 , cas 3). Nous pouvons également envisager de tester un ATH-RA réel dans un environnement de simulation de conduite. La modification du conflit accommodation convergence est illustrée sur la Figure cg.1, cas 2.

**Simulation virtuelle sur un seul écran    Simulation virtuelle sur écran + HUD réel    Situation réelle avec un HUD**

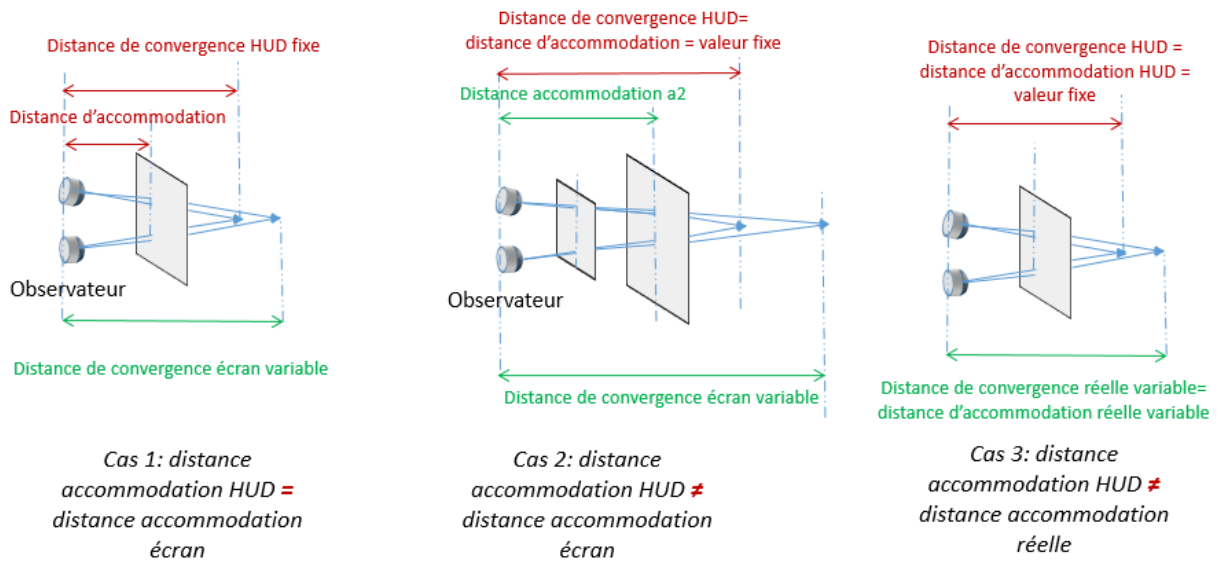


Figure cg.1 Conflit accommodation-convergence avec un ATH-RA dans différents cas

Dans notre étude, la simulation d'un ATH-RA se fait à travers le même écran où est déjà projetée la scène de conduite. Le conflit accommodatif (la distance d'accommodation virtuelle ne correspond pas à la distance d'accommodation naturelle) est certes toujours présent mais il reste fixe vis-à-vis de l'interface. Par contre en choisissant une distance fixe de projection pour l'ATH-RA, un conflit de convergence est généré, car la convergence des objets de la scène de conduite est variable (cf. Figure cg.2).

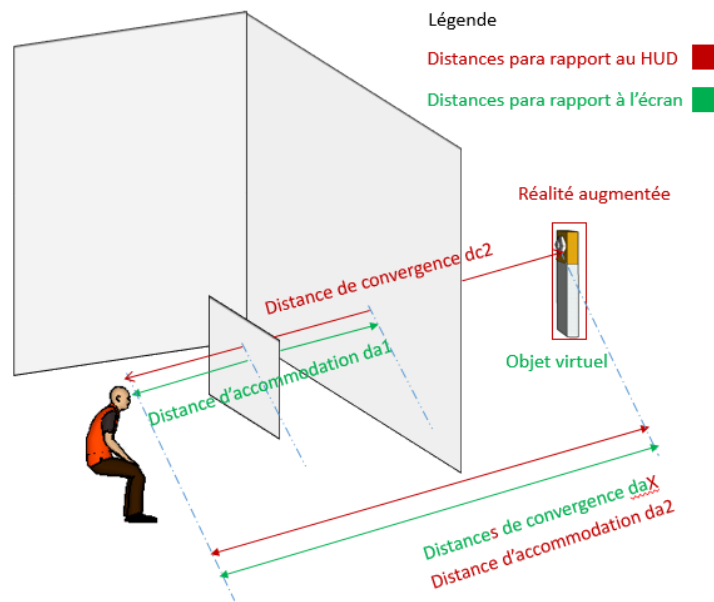


Figure cg.2 Simulation d'un ATH-RA et conflit accommodation-convergence

## Mal du simulateur

La théorie du conflit sensoriel (James T Reason & Brand, 1975) est l'hypothèse qui est généralement admise dans la littérature pour justifier l'apparition des symptômes du mal du simulateur. Les participants sont très sensibles à ce mal du simulateur, surtout ceux qui ne sont pas habitués aux milieux virtuels. Les fortes accélérations, les virages, et les freinages brusques sont tous des facteurs qui peuvent aggraver cette sensation. Pour ces raisons, non seulement la durée de test sur simulateur est limitée, mais le scénario de conduite est adapté pour réduire au mieux les symptômes liés au mal du simulateur.

## Perspectives

La simulation d'un ATH-RA modulable dans un environnement virtuel offre la possibilité d'envisager plusieurs cas de tests différents. Plusieurs pistes intéressantes restent inexplorées dans le paramétrage des ATH-RA. Nous proposons des réflexions en vue d'améliorer les recherches effectuées.

De nouvelles études alliant le domaine de la physiologie et de la psychophysique permettront d'approfondir ces recherches. Les caractéristiques visuelles des participants peuvent ainsi être prises en compte et vont permettre de mieux comprendre comment les informations virtuelles sont perçues par les conducteurs et comment optimiser les paramètres d'affichage.

Les mécanismes perceptuels sont perturbés dans un environnement virtuel. Dans le cadre de la simulation d'un ATH-RA, la perception visuelle est plus complexe. Nous avons présenté dans les figures précédentes (cf. Figure cg.1) les altérations physiologiques identifiées et nous les avons comparées à un ATH-RA réel. Il serait intéressant d'analyser plus précisément ces composantes physiologiques d'une manière objective dans les différents cas et de quantifier ces différences, pour évaluer les conséquences sur la perception RA des utilisateurs. Maintenant que la nature de ce conflit physiologique est identifiée, nous pouvons envisager de déterminer les limites acceptables de cette application et d'analyser la capacité d'adaptation des conducteurs.

L'autre point d'exploration est celui évoqué dans la discussion de la dernière expérimentation réalisée (cf. Chapitre 6 .2.4). Il s'agit d'établir les paramètres de l'ATH-RA en fonction des conditions de visibilité. Nos résultats expérimentaux montrent que les informations RA ne sont pas perçues de la même manière avec le changement de la visibilité. Nous avons notamment vu que la distance de 6m était plutôt confortable en mauvaise visibilité, tandis qu'en bonne condition de visibilité cette distance était beaucoup moins confortable. Ce qui nous amène à nous demander si la projection de l'ATH-RA à l'infini est vraiment adaptée en visibilité réduite, surtout avec le rapprochement du point accommodatif comme l'indique

plusieurs études dans la littérature (myopisation nocturne). Il est possible que la distance de projection idéale soit différente en fonction du niveau d'éclairage et de visibilité de la route. C'est pourquoi il serait intéressant de vérifier si le conducteur maintient le focus à l'infini, et si la projection des informations RA à une distance se rapprochant de l'infini optique ne perturbe pas l'estimation de la distance des objets environnants qui seraient plus proches du conducteur. Si la distance de projection n'est pas adaptée, cela risque de compromettre la stratégie du conducteur et entraîner plusieurs problèmes tels que : division de l'attention ou distraction, alternation du regard, contrainte de changement de focus, difficulté à détecter les événements ou les obstacles dans le voisinage proche et en périphérie du conducteur... Il se pose alors le problème des conséquences de l'adaptation d'une distance de projection fixe sur la perception des distances.

Nous avons également relevé dans la littérature que le mécanisme accommodatif est différent en fonction des caractéristiques visuelles des personnes (comme le rapprochement du point accommodatif avec l'âge). Pour éviter toute interférence de la variabilité inter-sujet avec les résultats, il serait intéressant de catégoriser les groupes expérimentaux en fonction de l'âge des personnes par exemple.

Les observations concernant le confort visuel peuvent être complétées avec l'analyse des mouvements des yeux et de la direction regardée. Plusieurs mesures objectives peuvent être effectuées avec un oculomètre. Nous pouvons notamment récupérer : les zones où le conducteur concentre son regard avec une carte de chaleur, le temps et la fréquence de visualisation de la RA, la fréquence de changement de la direction du regard et celle des clignements de l'œil, ainsi que la variation du diamètre pupillaire. Ces données supplémentaires peuvent être synchronisées avec les données objectives de la PMC, et cette analyse peut être couplée à l'étude subjective pour caractériser la stratégie visuelle des conducteurs dans différentes situations.





## Bibliographie

- [1] AbblaBmeier, M., Poitschke, T., Bengler, F. W. K., & Rigoll, G. (2007). Eye gaze studies comparing head-up and head-down displays in vehicles. In *2007 IEEE International Conference on Multimedia and Expo* (p. 2250–2252). IEEE. Consulté à l'adresse [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4285134](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4285134)
- [2] Académie en ligne. (s. d.). L'oeil et la representation visuelle. SN13-Sequence-01. Consulté 1 septembre 2016, à l'adresse <http://www.academie-en-ligne.fr/Ressources/7/SN13/AL7SN13TDPA0111-Sequence-01.pdf>
- [3] Anastassova, M. (2006). *L'analyse ergonomique des besoins en amont de la conception de technologies émergente: le cas de la Réalité Augmentée pour la formation à la maintenance automobile*. Université René Descartes-Paris V. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00340103/>
- [4] Anastassova, M., & Burkhardt, J.-M. (2009). Automotive technicians' training as a community-of-practice: Implications for the design of an augmented reality teaching aid. *Applied Ergonomics*, *40*(4), 713-721. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2008.06.008>
- [5] Andersson Hultgren, J., Blissing, B., & Jansson, J. (2012a). Effects of motion parallax in driving simulators. In *Driving Simulation Conference. Paris, France, September 6-7, 2012*. Consulté à l'adresse <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:658508>
- [6] Andersson Hultgren, J., Blissing, B., & Jansson, J. (2012b). Effects of motion parallax in driving simulators. Présenté à Driving Simulation Conference. Paris, France, September 6-7, 2012.
- [7] Army Aviation. (s. d.). NIGHTS STUDY GUIDE. Consulté 14 septembre 2016, à l'adresse <http://studylib.net/doc/8504178/nights---army-aviation>
- [8] Aytekin, M., & Rucci, M. (2012). Motion parallax from microscopic head movements during visual fixation. *Vision Research*, *70*, 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2012.07.017>
- [9] Azuma, R. (1995). *Predictive tracking for augmented reality*. Citeseer. Consulté à l'adresse <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.294.9259&rep=rep1&type=pdf>
- [10] Azuma, R., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent Advances in Augmented Reality. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, *21*(6), 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
- [11] Azuma, R. T., & others. (1997). A survey of augmented reality. *Presence*, *6*(4), 355–385.
- [12] Barma, S., Power, M., & Daniel, S. (2010). Réalité augmentée et jeu mobile pour une éducation aux sciences et à la technologie. In *Actes du colloque scientifique Ludovia 2010 «Interactivité/interactions–Enjeux relationnels*. Consulté à l'adresse



- [http://www.academia.edu/download/39469402/Ralit\\_augmente\\_et\\_jeu\\_mobile\\_pour\\_un\\_e\\_du20151027-16129-1ei0z7z.pdf](http://www.academia.edu/download/39469402/Ralit_augmente_et_jeu_mobile_pour_un_e_du20151027-16129-1ei0z7z.pdf)
- [13] Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2007). *Neuroscience: exploring the brain* (3. ed). Baltimore, Md.: Lippincott Williams & Wilkins.
- [14] Berthoz, A. (2008). Physiologie de la perception et de l'action. *L'annuaire du Collège de France. Cours et travaux*, (108), 303-327. <https://doi.org/10.4000/annuaire-cdf.314>
- [15] Betancur, J. A. (2011). *Physical Variable Analysis Involved in Head-Up Display Systems Applied to Automobiles*. INTECH Open Access Publisher. Consulté à l'adresse [http://www.intechopen.com/source/pdfs/24834/InTech-Physical\\_variable\\_analysis\\_involved\\_in\\_head\\_up\\_display\\_systems\\_applied\\_to\\_automobiles.pdf](http://www.intechopen.com/source/pdfs/24834/InTech-Physical_variable_analysis_involved_in_head_up_display_systems_applied_to_automobiles.pdf)
- [16] Bimber, O., & Raskar, R. (2006). Modern approaches to augmented reality. In *ACM SIGGRAPH 2006 Courses* (p. 1). ACM. Consulté à l'adresse <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1185796>
- [17] Boeck. (2016). Français : Structure de la rétine, imitée de Purves et als NEUROSCIENCES De Boeck, 2005. In Pancrat (Éd.), *Structure de la rétine*. Consulté à l'adresse <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Retina.svg>
- [18] Bottecchia, S. (2010). *Système TAC: Télé-Assistance Collaborative. Réalité augmentée et NTIC au service des opérateurs et des experts dans le cadre d'une tâche de maintenance industrielle supervisée*. Université Paul Sabatier-Toulouse III. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00656918/>
- [19] Braillon, C. (2007). *Détection d'obstacles par fusion de flux optique et stéréovision dans des grilles d'occupation*.
- [20] Broll, W., Ohlenburg, J., Lindt, I., Herbst, I., & Braun, A.-K. (2006). Meeting technology challenges of pervasive augmented reality games. In *Proceedings of 5th ACM SIGCOMM workshop on Network and system support for games* (p. 28). ACM. Consulté à l'adresse <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1230097>
- [21] Brown, R. D., Modro, D. H., Quast, G. A., Wallace, D. L., Vancleef, M. G., & Wood, R. B. (2004). Performance assessment of an LCOS-based head-up display (p. 146-155). Présenté à Defense and Security, International Society for Optics and Photonics.
- [22] Bruce, V., & Patrick R. Green. (1993). *La perception visuelle physiologie, psychologie et écologie* (Lunaire). Presses Universitaires de Grenoble: Librairie Le Cadran. Consulté à l'adresse <https://www.cadran-lunaire.fr/livre/470240-la-perception-visuelle-physiologie-psychologi-vicki-bruce-patrick-r-green-presses-universitaires-de-grenoble>
- [23] Burkhardt, J.-M., Bardy, B., & Lourdeaux, D. (2003). Immersion, Réalisme et Présence dans la conception et l'évaluation des. *Psychologie française*, 48(2), 35–42.

- [24] Castaneda, G., Gonzales, A., & Baluch, P. (2016, janvier 19). Comment fonctionne la vision | ASU - Ask A Biologist. Consulté 16 septembre 2016, à l'adresse <https://askabiologist.asu.edu/comment-voit>
- [25] Caudell, T. P., & Mizell, D. W. (1992). Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences, 1992* (Vol. ii, p. 659-669 vol.2). <https://doi.org/10.1109/HICSS.1992.183317>
- [26] CBS News. (2015). Neiman Marcus' high-tech « memory mirror » transforms shopping experience. Consulté 26 août 2016, à l'adresse <http://www.cbsnews.com/news/neiman-marcus-high-tech-memory-mirror-transforms-shopping-experience/>
- [27] Charissis, V., & Naef, M. (2007). Evaluation of Prototype Automotive Head-Up Display Interface: Testing Driver's Focusing Ability through a VR Simulation. In *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium* (p. 560-565). <https://doi.org/10.1109/IVS.2007.4290174>
- [28] Christian, V., Ferscha, A., Narzt, W., Pomberger, G., Kolb, D., Müller, R., ... Lindinger, C. (2004). *Smart Roads in the Pervasive Computing Landscape*. na. Consulté à l'adresse [https://www.soft.uni-linz.ac.at/Research/Publications/\\_Documents/SmartRoads-christian2004.pdf](https://www.soft.uni-linz.ac.at/Research/Publications/_Documents/SmartRoads-christian2004.pdf)
- [29] Cieutat, J.-M. (2013). *Quelques applications de la réalité augmentée: Nouveaux modes de traitement de l'information et de la communication. Effets sur la perception, la cognition et l'action*.
- [30] Clark, B., & Stewart, J. D. (1970). Thresholds for the Perception of Angular Acceleration about the Three Major Body Axes. *Acta Oto-Laryngologica*, 69(1-6), 231-238. <https://doi.org/10.3109/00016487009123358>
- [31] Claverie, B., Leger, A., Charbonneau, M., & Vaïda, P. (2010). Vision augmentée: vision «tête haute» dans le pilotage et le contrôle. Consulté à l'adresse <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/30069>
- [32] Cohen, Y., Zadok, D., Barkana, Y., Shochat, Z., Ashkenazi, I., Avni, I., & Morad, Y. (2007). Relationship between night myopia and night-time motor vehicle accidents. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 85(4), 367-370. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0420.2006.00875.x>
- [33] Collin, B., & Pham Dang, A. (s. d.). Appareil vestibulaire périphérique. Consulté 16 septembre 2016, à l'adresse <http://nantesorl.free.fr/Cours1/NYSTAGMUS/EC1680F4-A9A1-4B87-B103-4D1598CC4154.html>
- [34] Continental Automotive -Head-up Displays – Eying safety and comfort at all times. (s. d.). Consulté 14 septembre 2016, à l'adresse [http://www.continental-automotive.com/www/automotive\\_de\\_en/themes/passenger\\_cars/interior/instrumentation\\_displays/pi\\_head\\_up\\_en.html?page=3](http://www.continental-automotive.com/www/automotive_de_en/themes/passenger_cars/interior/instrumentation_displays/pi_head_up_en.html?page=3)

- [35] Cutting, J. E. (1997). How the eye measures reality and virtual reality. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 29(1), 27-36.  
<https://doi.org/10.3758/BF03200563>
- [36] Dagonneau, V. (2012). *Etude des liens entre immersion et présence pour la mise au point d'un simulateur de conduite de deux-roues motorisé*. Université Paris Sud-Paris XI.  
 Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00766116/>
- [37] Damien Gatinel. (2015). La pupille de l'oeil. Consulté 1 septembre 2016, à l'adresse  
<https://www.gatinel.com/recherche-formation/pupille-irienne/>
- [38] Dancette, M. (2015). À quoi ressemblera l'usine du futur? *Le journal de l'école de Paris du management*, (2), 15–22.
- [39] Direction des transports terrestres. (2008, décembre 12). Sécurité Routière - La vitesse diminue le champs de vision. Consulté 16 septembre 2016, à l'adresse  
<http://www.transports-terrestres.pf/spip.php?article136>
- [40] Dodge, R. (1903). Five types of eye movement in the horizontal meridian plane of the field of regard. *American Journal of Physiology--Legacy Content*, 8(4), 307-329.
- [41] Dubois, E. (2001, juillet 6). *Chirurgie augmentée: un cas de réalité augmentée; Conception et réalisation centrées sur l'utilisateur* (phdthesis). Université Joseph-Fourier - Grenoble I.  
 Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00004676/document>
- [42] Duysinx, P. (2010). Performances et comportement des véhicules. Consulté 14 septembre 2016, à l'adresse <http://www.ingveh.ulg.ac.be/uploads/education/meca-0004/notes/pcv2009.pdf>
- [43] D.W.F. van Krevelen, & R. Poelman. (2000). *IEEE and ACM international symposium on augmented reality: October 5-6, 2000, Munich, Germany: proceedings*. Los Alamitos, Calif: IEEE Computer Society.
- [44] Eddy BARILE. (s. d.). Institut Image - Thématiques. Consulté 23 août 2016, à l'adresse  
<http://institutimage.ensam.eu/thematiques-103789.kjsp?RH=1417094933445&RF=1418650910754>
- [45] EditoCEN. (s. d.). La réalité augmentée: dates clefs. Consulté 1 mars 2016, à l'adresse  
<http://www.crossmedias.fr/fr/2014/03/la-realite-augmentee-dates-clefs/>
- [46] Feiner, S., MacIntyre, B., Höllerer, T., & Webster, A. (1997). A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. *Personal Technologies*, 1(4), 208-217. <https://doi.org/10.1007/BF01682023>
- [47] Feiner, S., Macintyre, B., & Seligmann, D. (1993). Knowledge-based augmented reality. *Communications of the ACM*, 36(7), 53–62.
- [48] Fuchs, P., Moreau, G., & Burkhardt, J.-M. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle Volume 2-L'interfaçage: l'immersion et l'interaction en environnement virtuel*.

- [49] Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 461-472. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2004.11.003>
- [50] George, P., Thouvenin, I., Fremont, V., & Cherfaoui, V. (2012). DAARIA: Driver assistance by augmented reality for intelligent automobile (p. 1043-1048). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IVS.2012.6232220>
- [51] Ghouaiel, N., Cieutat, J.-M., & Jessel, J. P. (2011). MARTS: Conception d'un Système Mobile de Réalité Augmentée Dédié au Tourisme (p. 16-20). Présenté à Ubimob 2011.
- [52] Gibson, E. J., Gibson, J. J., Smith, O. W., & Flock, H. (1959). Motion parallax as a determinant of perceived depth. *Journal of experimental psychology*, 58(1), 40.
- [53] Gibson, J. J. (1950). The perception of the visual world.
- [54] Gibson, J. J. (1968). What gives rise to the perception of motion? *Psychological Review*, 75(4), 335.
- [55] Gish, K. W., & Staplin, L. (1995). Human factors aspects of using head up displays in automobiles: A review of the literature. Consulté à l'adresse <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1167034>
- [56] Glogger. (2016, mars 3). Steve Mann. In *Wikipédia*. Consulté à l'adresse [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Steve\\_Mann&oldid=123935904](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Steve_Mann&oldid=123935904)
- [57] Goldberg, J. M., & Fernández, C. (2011). The Vestibular System. In R. Terjung (Éd.), *Comprehensive Physiology*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. Consulté à l'adresse <http://doi.wiley.com/10.1002/cphy.cp010321>
- [58] Golias, J., Yannis, G., & Antoniou, C. (2002). Classification of driver-assistance systems according to their impact on road safety and traffic efficiency. *Transport Reviews*, 22(2), 179-196. <https://doi.org/10.1080/01441640110091215>
- [59] Green, M. (2008). *Forensic Vision with Application to Highway Safety*. Lawyers & Judges Publishing Company.
- [60] Green, P., Hoekstra, E., Williams, M., Wen, C., & George, K. (1993). On-the-Road Tests of Driver Interfaces: Examination of a Route Guidance System and a Car Phone. *Univ Mich Transp Res Inst Tech Rep UMTRI*, 93(31), 1-90.
- [61] Gupta, D. (2004). An empirical study of the effects of context-switch, object distance, and focus depth on human performance in augmented reality. Consulté à l'adresse <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/33507>
- [62] Hamidia, M., Zenati-Henda, N., Belghit, H., & Belhocine, M. (2014). Markerless tracking using interest window for augmented reality applications. In *Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2014 International Conference on* (p. 20-25). IEEE. Consulté à l'adresse [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6911133](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6911133)

- [63] Harkin, D., Cartwright, W., & Black, M. (2005). Decomposing the map: using head-up display for vehicle navigation. In *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference*. Consulté à l'adresse <http://www.cartesia.es/geodoc/icc2005/pdf/poster/TEMA26/DANE%20HARKIN.pdf>
- [64] Heilig Morton L. (1962, août 28). Sensorama simulator. Consulté à l'adresse <https://www.google.com/patents/US3050870>
- [65] Herbert Yoo, O. T., Watanabe, H., Green, P., & Shah, R. (1999). *Display of HUD Warnings to drivers: determining an optimal location*.
- [66] Herling, J., & Broll, W. (2011). Markerless tracking for augmented reality. In *Handbook of Augmented Reality* (p. 255-272). Springer.
- [67] Hicheur, H. (2006). *Contrôle et guidage de la locomotion humaine*. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00161881/>
- [68] Hoc, J.-M., Mars, F., Milleville-Pennel, I., Jolly, É., Netto, M., & Blossville, J.-M. (2006). Human-machine cooperation in car driving for lateral safety : delegation and mutual control. *Le travail humain*, 69(2), 153-182.
- [69] Hong Hua, Chunyu Gao, Brown, L. D., Ahuja, N., & Rolland, J. P. (2002). A testbed for precise registration, natural occlusion and interaction in an augmented environment using a head-mounted projective display (HMPD) (p. 81-89). IEEE Comput. Soc. <https://doi.org/10.1109/VR.2002.996508>
- [70] Hua, H., & Gao, C. (2005). A polarized head-mounted projective display. In *Fourth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'05)* (p. 32-35). IEEE. Consulté à l'adresse [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1544660](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1544660)
- [71] Hua, H., Gao, C., Biocca, F., & Rolland, J. P. (2001). An ultra-light and compact design and implementation of head-mounted projective displays. In *Virtual Reality, 2001. Proceedings. IEEE* (p. 175-182). IEEE. Consulté à l'adresse [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=913784](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=913784)
- [72] Hua, H., Girardot, A., Gao, C., & Rolland, J. P. (2000). Engineering of head-mounted projective displays. *Applied Optics*, 39(22), 3814. <https://doi.org/10.1364/AO.39.003814>
- [73] Inuzuka, Y., Osumi, Y., & Shinkai, H. (1991). Visibility of Head up Display (HUD) for Automobiles. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 35(20), 1574-1578. <https://doi.org/10.1177/154193129103502033>
- [74] Isermann, R., Mannale, R., & Schmitt, K. (2010). Collision avoidance systems PRORETA: situation analysis and intervention control. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(7), 461-470. <https://doi.org/10.3182/20100712-3-DE-2013.00202>

- [75] Jaschinski-Kruza, W. (1991). On proximal effects in objective and subjective testing of dark accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 11(4), 328-334.  
<https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.1991.tb00233.x>
- [76] J. Weiss. (1998). Perception Visuelle Humaine. Consulté 1 septembre 2016, à l'adresse <http://www.rennes.supelec.fr/ren/perso/jweiss/tv/perception/perception.pdf>
- [77] Jean-Michel, R. (2013). *La réalité augmentée: Techniques et entités virtuelles*. Lavoisier.
- [78] Julien Bergounhoux. (2014, IFA). IFA 2014: Panasonic présente un miroir de maquillage à réalité augmentée. Consulté 24 août 2016, à l'adresse <http://www.industrie-techno.com/ifa-2014-panasonic-presente-un-miroir-de-maquillage-a-realite-augmentee.32246>
- [79] Kato, H., & Billinghurst, M. (1999). Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system (p. 85-94). *IEEE Comput. Soc.*  
<https://doi.org/10.1109/IWAR.1999.803809>
- [80] Kato, H., Ito, H., Shima, J., Imaizumi, M., & Shibata, H. (1992). Development of Hologram Head-Up Display. Consulté 22 septembre 2016, à l'adresse <http://papers.sae.org/920600/>
- [81] Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in cognitive sciences*, 7(1), 31-37.
- [82] Kersten, D., & Legge, G. E. (1983). Convergence accommodation. *JOSA*, 73(3), 332-338.
- [83] Kim, S., & Dey, A. K. (2009). Simulated augmented reality windshield display as a cognitive mapping aid for elder driver navigation. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (p. 133-142). ACM. Consulté à l'adresse <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1518724>
- [84] Knoll, H. A. (1952). A brief history of « Nocturnal myopia » and related phenomena. *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry*, 29(2), 69-81.
- [85] Krueger, M. W. (1977). Responsive environments. In *Proceedings of the June 13-16, 1977, national computer conference* (p. 423-433). ACM. Consulté à l'adresse <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1499476>
- [86] La vitesse - Code de la route. (2013). Cours du code de la route. Consulté 16 septembre 2016, à l'adresse <http://www.permik.net/cours-code-de-la-route-gratuit/vitesse.php>
- [87] Lamble, D., Kauranen, T., Laakso, M., & Summala, H. (1999). Cognitive load and detection thresholds in car following situations: safety implications for using mobile (cellular) telephones while driving. *Accident Analysis & Prevention*, 31(6), 617-623.
- [88] Lancelle, M. (2001). *Visual Computing in Virtual Environments*. Graz University of Technology, Austria. Consulté à l'adresse <http://www.generative->

modeling.org/CGVold/ALUMNI/Lancelle/dissertation/Lancelle\_VisualComputingInVirtualEnvironments\_lowRes.pdf

- [89] Land, M. F., & Lee, D. N. (1994). Where we look when we steer. *Nature*, 369(6483), 742-744. <https://doi.org/10.1038/369742a0>
- [90] Land, M. F., & Tatler, B. W. (2001). Steering with the head: The visual strategy of a racing driver. *Current Biology*, 11(15), 1215–1220.
- [91] Larouzee, J., Guarnieri, F., & Besnard, D. (2014). *Le modèle de l'erreur humaine de James Reason*. Papiers de Recherche du CRC, MINES ParisTech. Consulté à l'adresse <https://hal-institut-mines-telecom.archives-ouvertes.fr/hal-01102402/document>
- [92] Le Blaye, P., & Marchand, A. L. (2005). Projet de guide méthodologique pour l'évaluation facteurs humains des collimateurs tête haute. Consulté 14 septembre 2016, à l'adresse [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERA\\_2005\\_Guide\\_certification\\_HUD.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERA_2005_Guide_certification_HUD.pdf)
- [93] Lee, M.-S., Lee, K., Kim, S.-Y., Lee, H., Park, J., Choi, K.-H., ... Park, J.-U. (2013). High-Performance, Transparent, and Stretchable Electrodes Using Graphene–Metal Nanowire Hybrid Structures. *Nano Letters*, 13(6), 2814-2821. <https://doi.org/10.1021/nl401070p>
- [94] Leino, O., Wirman, H., & Fernandez, A. (2008). *Extending Experiences: Structure, Analysis and Design of Computer Game Player Experience*. Lapland University Press.
- [95] Leroy, L. (2009). Interfaçage visuel stéréoscopique: diminution de la fatigue visuelle et caractérisation de la perception des formes.
- [96] Lie, I. (1965). Convergence as a Cue T O Perceived Size and Distance. *Scandinavian Journal of Psychology*, 6(4), 109-116. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1965.tb01059.x>
- [97] Lindeman, R. W., & Haruo Noma. (2007). A classification scheme for multi-sensory augmented reality (p. 175). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1315184.1315216>
- [98] Liu, Y.-C., & Wen, M.-H. (2004). Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61(5), 679-697. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.06.002>
- [99] Lobjois, R. (2016). Comment rendre pertinente une situation de réalité virtuelle? *Ergonomics*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1149229>
- [100] MacDougall, H. G., & Moore, S. T. (2005). Functional assessment of head–eye coordination during vehicle operation. *Optometry & Vision Science*, 82(8), 706-715.
- [101] Mackay, W. E. (1996). Augmenting reality: A new paradigm for interacting with computers. *La recherche*, 3. Consulté à l'adresse <http://www-ihm.lri.fr/~mackay/pdffiles/LaRecherche.English.pdf>

- [102] Malaterre, G., & Fréchaux, J. (2001). Etude de la validité des simulateurs de conduite par comparaison de tâches réalisées en situation réelle et en simulation. *Actes Inrets*, 149-156.
- [103] Mann, S. (2002). *Intelligent image processing*. New York: IEEE J. Wiley.
- [104] Marouane, H. (2011). *Méthode de reconfiguration dynamique pour un réseau-sur-puce tolérant aux fautes*. École Polytechnique de Montréal. Consulté à l'adresse <http://publications.polymtl.ca/745/>
- [105] Mas, A. (2012). *Utilisation des simulateurs de conduite pour l'évaluation des systèmes d'aide à la conduite en situation d'urgence*. Arts et Métiers ParisTech. Consulté à l'adresse <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00714217/>
- [106] McLean, J. R., & Hoffmann, E. R. (1975). Steering Reversals as a Measure of Driver Performance and Steering Task Difficulty. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 17(3), 248-256.  
<https://doi.org/10.1177/001872087501700304>
- [107] Meiry, J. L. (1965). *The vestibular system and human dynamic space orientation*. Massachusetts Institute of Technology. Consulté à l'adresse <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/12945>
- [108] Mershon, D., & Amerson, T. (1980). Stability of measures of the dark focus of accommodation. *Investigative ophthalmology & visual science*, 19(2), 217-221.
- [109] Mestre, D. R., & Authié, C. N. (2012). Why Do We Move our Head during Curve Driving? *Advances in Human Aspects of Road and Rail Transportation*, 412.
- [110] Mestre, D. R., Mars, F., Durand, S., Vienne, F., & Espié, S. (2005). Gaze Behavior during Simulated Driving: Elements for a Visual Driving Aid. Présenté à Driving Assessment 2005: 3rd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design. Consulté à l'adresse <https://trid.trb.org/view.aspx?id=763273>
- [111] MicroVision, Inc. | Laser beam scanning projection and imaging solutions. (s. d.). Consulté 13 septembre 2016, à l'adresse <http://www.microvision.com/>
- [112] Milgram, P. (2006). *Some human factors considerations for designing mixed reality interfaces*. DTIC Document. Consulté à l'adresse <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA473283>
- [113] Milgram, P., & Colquhoun, H. (1999). A taxonomy of real and virtual world display integration. *Mixed reality: Merging real and virtual worlds*, 1, 1-26.
- [114] Milgram, P., & Drascic, D. (1997). Perceptual effects in aligning virtual and real objects in augmented reality displays. In *Proceedings of the Human Factors and*



- Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 41, p. 1239–1243). SAGE Publications. Consulté à l'adresse <http://pro.sagepub.com/content/41/2/1239.short>
- [115] Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12), 1321–1329.
- [116] Multimedia: History, Theory and Practice. (s. d.). Consulté 26 août 2016, à l'adresse <http://www.zakros.com/ucb/histS99/Notes/Class6/Class6.html>
- [117] Narzt, W., Pomberger, G., Ferscha, A., Kolb, D., Muller, R., Wieghardt, J., ... Lindinger, C. (2003). Pervasive information acquisition for mobile AR-navigation systems (p. 13-20). Présenté à Mobile Computing Systems and Applications, 2003. Proceedings. Fifth IEEE Workshop on, IEEE.
- [118] Narzt, W., Pomberger, G., Ferscha, A., Kolb, D., Müller, R., Wieghardt, J., ... Lindinger, C. (2004). A new visualization concept for navigation systems (p. 440-451). Présenté à ERCIM Workshop on User Interfaces for All, Springer.
- [119] Narzt, W., Pomberger, G., Ferscha, A., Kolb, D., Müller, R., Wieghardt, J., ... Lindinger, C. (2006). Augmented reality navigation systems. *Universal Access in the Information Society*, 4(3), 177-187. <https://doi.org/10.1007/s10209-005-0017-5>
- [120] Nawrot, M. (2003). Depth from motion parallax scales with eye movement gain. *Journal of Vision*, 3(11), 17-17. <https://doi.org/10.1167/3.11.17>
- [121] Neboit, M. (1982). L'exploration visuelle du conducteur: rôle de l'apprentissage et de l'expérience. *CAH ETUD ONSER*, (56).
- [122] Nicolau, S., Garcia, A., Penneç, X., Soler, L., & Ayache, N. (2005). An augmented reality system to guide radio-frequency tumour ablation. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 16(1), 1-10. <https://doi.org/10.1002/cav.52>
- [123] Nigay, L. (2002). Conception centrée utilisateur – apports de la psychologie. Consulté 17 septembre 2016, à l'adresse <http://iihm.imag.fr/nigay/ENSEIG/M2ProGI/MULTIMOBILE/Documents/SupportCours/Partie1.pdf>
- [124] Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7(1), 44-64. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(75\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90004-3)
- [125] Norman, J., & Ehrlich, S. (1986). Visual Accommodation and Virtual Image Displays: Target Detection and Recognition. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 28(2), 135-151. <https://doi.org/10.1177/001872088602800202>
- [126] Normand, J., Servieres, M., & Moreau, G. (2012). A typology of augmented reality applications based on their tracking requirements. In *Location Awareness for Mixed and Dual Reality. LAMDa workshop. Lisbon, Portugal*. Consulté à l'adresse

- [http://www.dfki.de/LAMDa/2012/accepted/A\\_Typology\\_Of\\_Augmented\\_Reality\\_Applications.pdf](http://www.dfki.de/LAMDa/2012/accepted/A_Typology_Of_Augmented_Reality_Applications.pdf)
- [127] Normark, C. J., Tretten, P., & Gärling, A. (2009). Do redundant head-up and head-down display configurations cause distractions. In *Proceedings of the 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment and Design* (p. 398–404). Consulté à l'adresse [https://www.researchgate.net/profile/Carl\\_Joergen\\_Normark/publication/237529164\\_DO\\_REDUNDANT\\_HEAD-UP\\_AND\\_HEAD-DOWN\\_DISPLAY\\_CONFIGURATIONS\\_CAUSE\\_DISTRACTIONS/links/02e7e53454124b6a7f000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Carl_Joergen_Normark/publication/237529164_DO_REDUNDANT_HEAD-UP_AND_HEAD-DOWN_DISPLAY_CONFIGURATIONS_CAUSE_DISTRACTIONS/links/02e7e53454124b6a7f000000.pdf)
- [128] Oliveira, R., Farinha, T., Raposo, H., & Pires, N. (2014). Augmented reality and the future of maintenance. In J. T. Farinha & D. Galar, *Proceedings of Maintenance Performance Measurement and Management (MPMM) Conference 2014* (p. 81-88). Imprensa da Universidade de Coimbra. Consulté à l'adresse <https://digitalis.uc.pt/handle/10316.2/33320>
- [129] Olwal, A. (2015). Next-Generation Head-up Displays. Consulté à l'adresse [http://web.media.mit.edu/~olwal/projects/research/huds/olwal\\_next\\_gen\\_huds\\_2005.pdf](http://web.media.mit.edu/~olwal/projects/research/huds/olwal_next_gen_huds_2005.pdf)
- [130] Ono, H., & Ujike, H. (2005). Motion parallax driven by head movements: Conditions for visual stability, perceived depth, and perceived concomitant motion. *Perception*, 34(4), 477-490.
- [131] Orliac, C. (2013). *Modèles et outils pour la conception de Learning Games en Réalité Mixte*. INSA de Lyon. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00952892/>
- [132] Ouramdane, N. (2008). *Vers un système d'assistance à l'interaction 3D pour le travail et le télétravail collaboratif dans les environnements de réalité virtuelle et augmentée*. Evry-Val d'Essonne. Consulté à l'adresse <http://www.theses.fr/2008EVRY0028>
- [133] Palmqvist, L. (2013). Depth Perception in Driving Simulators: Observer-produced motion parallax, how it affects car drivers' position and perceived presence. Consulté à l'adresse <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:648964>
- [134] Perrin, C., Canu, B., Magnin, J., & Parraud, C. (2011). Études Détaillées d'Accidents (EDA): intérêt pour la compréhension du rôle de l'infrastructure. Consulté 17 septembre 2016, à l'adresse [http://www.ouest.cerema.fr/IMG/pdf/8-Analyse\\_de\\_1\\_accident-EDA\\_et\\_role\\_infra-IFSTTAR.pdf](http://www.ouest.cerema.fr/IMG/pdf/8-Analyse_de_1_accident-EDA_et_role_infra-IFSTTAR.pdf)
- [135] Peterson, S. (2005). Collimation in transparent projection screens for panoramic augmented reality environments. In *5th EUROCONTROL innovative research and exhibition workshop*. Consulté à l'adresse [http://publish.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/conference/paper/2005/012\\_Collimation\\_in\\_transparent\\_projection\\_screens.pdf](http://publish.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/conference/paper/2005/012_Collimation_in_transparent_projection_screens.pdf)

- [136] Peterson, S., & Pinska, E. (2006). Human Performance with simulated Collimation in Transparent Projection Screens. In *Proceedings of the Second International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)* (p. 231–237). Consulté à l'adresse [http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/documents/EEC\\_INO\\_documents/INO\\_documents/paper\\_icrat06\\_final.pdf](http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/documents/EEC_INO_documents/INO_documents/paper_icrat06_final.pdf)
- [137] Purves, D., & Williams, S. M. (Éd.). (2004). *Neuroscience* (3. ed). Sunderland, Mass: Sinauer.
- [138] R John Leigh, S. K. (2006). Neuroscience of Eye Movements. *ACNR*, 16, 11.
- [139] Ranney, T. (1994). Models of driving behavior a review of their evolution. Pergamon.
- [140] Raymond, J. (2007). récepteurs; canaux semi-circulaires; macules otolithiques. Consulté 16 septembre 2016, à l'adresse [http://www.neuroreille.com/levestibule/chapb/f\\_parents-chapb.htm](http://www.neuroreille.com/levestibule/chapb/f_parents-chapb.htm)
- [141] Reason, J. (1995). Understanding adverse events: human factors. *Quality in Health Care*, 4(2), 80-89.
- [142] Reason, J. T. (1990). *Human error*. Cambridge [England]; New York: Cambridge University Press.
- [143] Reason, J. T., & Brand, J. J. (1975). *Motion sickness*. Academic press.
- [144] Rebetez, C. (2003). Les mouvements oculaires et la localisation spatiale lors d'un déplacement.
- [145] Reitmayr, G., & Drummond, T. W. (2006). Going out: robust model-based tracking for outdoor augmented reality. In *IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2006. ISMAR 2006* (p. 109-118). <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2006.297801>
- [146] Rekimoto, J. (1998). Matrix: A realtime object identification and registration method for augmented reality. In *Computer Human Interaction, 1998. Proceedings. 3rd Asia Pacific* (p. 63–68). IEEE. Consulté à l'adresse [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=704151](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=704151)
- [147] Richards, O. W. (1967). Night myopia at night automobile driving luminances. *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry*, 44(8), 517-523.
- [148] Richards, O. W. (1978). Night Myopia at Night Automobile Luminances: Final Report. *Optometry and Vision Science*, 55(7), 469-470. <https://doi.org/10.1097/00006324-197807000-00006>
- [149] Riemersma, J. B. J. (1981). Visual control during straight road driving. *Acta Psychologica*, 48(1–3), 215-225. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(81\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(81)90063-9)

- [150] Roumes, C., Fornette, M.-P., Valot, C., & Le Blaye, P. (2001). Symbologie des collimateurs tête haute (HUD) : Etude pré réglementaire pour le SFACT. ONERA/DCSD. Consulté 14 septembre 2016, à l'adresse <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/hudF.pdf>
- [151] Saad, F. (1975). Structuration de la tâche et activités perceptives dans la conduite automobile. *Document interne de l'ONSER*.
- [152] Sandini, G., Panerai, F., & Miles, F. A. (2001). The role of inertial and visual mechanisms in the stabilization of gaze in natural and artificial systems. In *Motion Vision* (p. 189–218). Springer. Consulté à l'adresse [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-56550-2\\_11](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-56550-2_11)
- [153] Schéma du champ visuel humain. (2010). In *Wikipédia*. Consulté à l'adresse [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Champ\\_visuel&oldid=127422974](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Champ_visuel&oldid=127422974)
- [154] Schimpf, O. (2010, avril 18). La Réalité augmentée, comment ça marche? Consulté 29 février 2016, à l'adresse <http://www.augmented-reality.fr/2010/04/la-realite-augmentee-comment-ca-marche/>
- [155] Shahid, M., Nawaz, T., & Habib, H. A. (2013). Eye-Gaze and Augmented Reality Framework for Driver Assistance. *Life Science Journal*, 10(3). Consulté à l'adresse [http://www.lifesciencesite.com/lj/life1003/236\\_20281life1003\\_1571\\_1578.pdf](http://www.lifesciencesite.com/lj/life1003/236_20281life1003_1571_1578.pdf)
- [156] Shibata, T., Kim, J., Hoffman, D. M., & Banks, M. S. (2011). The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. *Journal of Vision*, 11(8), 11-11. <https://doi.org/10.1167/11.8.11>
- [157] Soualmi, B. (2014, janvier 16). *Coopération Homme Machine pour la conduite automatisée : une approche par partage haptique du contrôle* (phdthesis). Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01122903/document>
- [158] Southard, D. A. (1993). Transformations for stereoscopic visual simulation. *Computers & Graphics*, 16(4), 401-410.
- [159] Spillmann, L., & Werner, J. S. (2012). *Visual perception: The neurophysiological foundations*. Elsevier.
- [160] Sullivan, J. M., Bärghman, J., Adachi, G., Schoettle, B., & others. (2004). Driver performance and workload using a night vision system. *Transportation Research Institute, University of Michigan, Ann Arbor, MI: University of Michigan, Industry Affiliation Program for Human Factors in Transportation Safety*. Consulté à l'adresse <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/55194/umtri-2004-8.pdf?sequence=1>

- [161] Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I* (p. 757-764). ACM. Consulté à l'adresse <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1476686>
- [162] Takezaki, J., Ueki, N., & Minowa, T. (s. d.). *Support System for Safe Driving — A Step Toward ITS Autonomous Driving* —.
- [163] Thomas A. Ranney. (1999). Psychological factors that influence car-following and car-following model development. Consulté à l'adresse <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847800000103>
- [164] Todoriki, T. (1994). Application of head-up displays for in-vehicle navigation/route guidance. Présenté à Vehicle Navigation and Information Systems Conference (5th: 1994: Yokohama, Japan). 1994 Vehicle Navigation & Information Systems Conference proceedings.
- [165] Tonetti, J. (2003). *Réalisation d'outils de réalité augmentée: apprentissage, simulation et guidage de gestes en chirurgie du bassin*. Université Joseph Fourier (Grenoble). Consulté à l'adresse <http://www.theses.fr/2003GRE19011>
- [166] Tonnis, M., & Klinker, G. (2006). Effective control of a car driver's attention for visual and acoustic guidance towards the direction of imminent dangers. In *Proceedings of the 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (p. 13-22). IEEE Computer Society. Consulté à l'adresse <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1514211>
- [167] Tonnis, M., Sandor, C., Lange, C., & Bubb, H. (2005). Experimental evaluation of an augmented reality visualization for directing a car driver's attention. In *Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (p. 56-59). IEEE Computer Society. Consulté à l'adresse <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1105175>
- [168] Troxell, J. R., Harrington, M. I., & Perisho, R. A. (1997). Reconfigurable head up displays for enhanced vehicle-to-driver communication (p. 308-313). Présenté à Intelligent Transportation System, 1997. ITSC'97., IEEE Conference on, IEEE.
- [169] Tufano, D. R. (1997). Automotive HUDs: The overlooked safety issues. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39(2), 303-311.
- [170] Vernet, M. (2009). *Coordination des Mouvements Oculaires dans l'Espace 3D chez l'Homme: substrat Cortical Étudié par TMS*. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI. Consulté à l'adresse <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-00459341/>
- [171] Vernet, M., Faigneau, F., Vallat-Zakosek, M., Letisserand, D., Deleurence, P., & Chautemps, F. (2001). Systèmes anti-collisions: capacités des conducteurs à utiliser des signaux d'alerte. Rapport final. Partie 1: mise au point de la méthode, partie 2: influence de l'âge sur les temps de réponses. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00546451/>

- [172] Vishton, P. M., & Cutting, J. E. (1995). Wayfinding, displacements, and mental maps: velocity fields are not typically used to determine one's aimpoint. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(5), 978.
- [173] Von Hofsten, C. (1976). The role of convergence in visual space perception. *Vision Research*, 16(2), 193-198. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(76\)90098-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(76)90098-5)
- [174] Wagenaar, W. A. (1992). Risk taking and accident causation. In *Risk-taking behavior* (p. 257-281). Oxford, England: John Wiley & Sons.
- [175] Warren, W. H., & Hannon, D. J. (1990). Eye movements and optical flow. *JOSA A*, 7(1), 160-169.
- [176] Wellner, P. (1991). The DigitalDesk calculator: tangible manipulation on a desk top display. In *Proceedings of the 4th annual ACM symposium on User interface software and technology* (p. 27-33). ACM. Consulté à l'adresse <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=120785>
- [177] Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performance* (3rd ed). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [178] Wilde, G. (1998). Risk homeostasis theory: an overview. *Injury Prevention*, 4(2), 89-91.
- [179] Yang, Y. (2011, décembre 1). *The effects of increased workload on driving performance and visual behaviour* (Phd). University of Southampton. Consulté à l'adresse <http://eprints.soton.ac.uk/333256/>
- [180] Yang, Y., & Cao, Q. (2013). A Fast Feature Points-Based Object Tracking Method for Robot Grasp. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 1. <https://doi.org/10.5772/55951>
- [181] Zikovitz, D. C., & Harris, L. R. (1999). Head tilt during driving. *Ergonomics*, 42(5), 740-746.



# LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 FONCTIONNEMENT D'UNE APPLICATION RA (SCHIMPF, 2010)	14
FIGURE 1.2 LE CONTINUUM DE LA REALITE VIRTUELLE (MILGRAM & KISHINO, 1994)	15
FIGURE 1.3 HMD OPTIQUE (SUTHERLAND, 1968)	17
FIGURE 1.4 HMD RA POUR LES PILOTES	18
FIGURE 1.5 PHOTOMONTAGE MONTRANT LES DIFFERENTES CAMERAS PORTEES PAR STEVE MANN DE 1980 A 1999 (GLOGGER, 2016)	18
FIGURE 1.6 KARMA (FEINER, MACINTYRE, & SELIGMANN, 1993)	19
FIGURE 1.7 « THE DIGITAL DESK » (WELLNER, 1991)	19
FIGURE 1.8 « THE TOURING MACHINE » (FEINER ET AL., 1997)	20
FIGURE 1.9 TAXONOMIE FONCTIONNELLE DE LA RA	25
FIGURE 1.10 TECHNIQUES D'AFFICHAGE (BIMBER & RASKAR, 2006)	28
FIGURE 1.11 LES AFFICHAGES OPTIQUES (R. AZUMA, 1995)	29
FIGURE 1.12 LES AFFICHAGES VIDEO (R. AZUMA, 1995)	29
FIGURE 1.13 HEAD MOUNTED PROJECTIVE DISPLAY – HMPD (HUA & GAO, 2005)	30
FIGURE 1.14 PLAGES DE DETECTION DES CAPTEURS (BOSCH)	32
FIGURE 1.15 SCHEMA CONCEPTUEL HUD DE (BROWN ET AL., 2004) REPRIS PAR (OLWAL, 2015)	35
FIGURE 1.16 CONTINENTAL ENGINEERING SERVICES-FACT SHEET OF HUD COMBINER (« CONTINENTAL AUTOMOTIVE -HEAD-UP DISPLAYS – EYING SAFETY AND COMFORT AT ALL TIMES », S. D.)	36
FIGURE 1.17 (NARZT ET AL., 2003, 2004)	39
FIGURE 1.18 (KIM & DEY, 2009)	39
FIGURE 2.1 ŒIL HUMAIN (CASTANEDA, GONZALES, & BALUCH, 2016)	41
FIGURE 2.2 STRUCTURE DE LA RETINE (BOECK, 2016)	43
FIGURE 2.3 REPARTITION DES PHOTORECEPTEURS SUR LA RETINE (J. WEISS, 1998)	43
FIGURE 2.4 SENSIBILITES LUMINEUSES DES CONES ET BATONNETS (J. WEISS, 1998)	44
FIGURE 2.5 (« SCHEMA DU CHAMP VISUEL HUMAIN », 2010)	45
FIGURE 2.6 DIFFERENTES ZONES D'ACTION DE LA VISION OCULAIRE (J. WEISS, 1998)	46
FIGURE 2.7 CHAMP VISUEL STATIQUE A 180° ET 90° A UNE VITESSE DE 90KM/H	46
FIGURE 2.8 CHAMPS VISUELS EN FONCTION DE LA VITESSE DU VEHICULE	46
FIGURE 2.9 DYNAMIQUE DE LUMINANCE DE L'ŒIL HUMAIN (SPILLMANN & WERNER, 2012)	48
FIGURE 2.10 LES INDICES VISUELS	50
FIGURE 2.11 PARALLAXE DE MOUVEMENT (REBETEZ, 2003; SANDINI, PANERAI, & MILES, 2001)	51
FIGURE 2.12 CHAMP DE VITESSE INSTANTANEE PRODUIT PAR LA TRANSLATION D'UN OBSERVATEUR	52
FIGURE 2.13 CHAMP DE VITESSE PRODUIT PAR LA ROTATION DE L'ŒIL VERS LE BAS ET LA DROITE	52
FIGURE 2.14 CHAMP DE VITESSE PRODUIT PAR UNE COMBINAISON DE TRANSLATION ET D ROTATION	52
FIGURE 2.15 SCHEMA SIMPLISTE DE LA PERCEPTION VISUELLE (ACADEMIE EN LIGNE, S. D.)	53
FIGURE 2.16 L'OREILLE HUMAINE (ADAPTATION DE BEAR, CONNORS, & PARADISO, 2007)	54
FIGURE 2.17 LE SYSTEME VESTIBULAIRE (COLLIN & PHAM DANG, S. D.)	55
FIGURE 2.18 PLANS ET AXES DE ROTATION DU CORPS HUMAIN (ADAPTATION DE (PURVES & WILLIAMS, 2004) PAR (DAGONNEAU, 2012) )	56
FIGURE 2.19 ROLE DU CANAL SEMI-CIRCULAIRE VERTICAL	56
FIGURE 2.20 ROLE DU CANAL SEMI-CIRCULAIRE ANTERIEUR	56
FIGURE 2.21 ROLE DU CANAL SEMI-CIRCULAIRE HORIZONTAL	56
FIGURE 2.22 INTERACTION CONDUCTEUR-VEHICULE-ENVIRONNEMENT (PERRIN, CANU, MAGNIN, & PARRAUD, 2011)	58
FIGURE 2.23 SYSTEME VEHICULE-CONDUCTEUR-ENVIRONNEMENT A CONSIDERER POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT, PROPOSE PAR (DUYSINX, 2010)	58
FIGURE 2.24 REPERE VEHICULE SELON LA NORME SAE(DUYSINX, 2010)	59
FIGURE 2.25. LES ACTIVITES MISES EN JEU DURANT LA CONDUITE AUTOMOBILE (NEBOIT, 1979)	60
FIGURE 2.26 MODELE DE COMPORTEMENT DU CONDUCTEUR SELON MICHON	60



FIGURE 2.27 MODELE SIMPLIFIE DES 3 NIVEAUX DE CONTROLE DES COMPORTEMENTS HUMAINS (NIGAY, 2002) .....	62
FIGURE 2.28. CLASSIFICATION DES ERREURS (J. REASON, 1995) .....	64
FIGURE 2.29 LES FACTEURS INFLUANT SUR LA CHARGE MENTALE DU CONDUCTEUR (YAN YANG, 2011) .....	65
FIGURE 2.30 DOMAINES IMPLIQUES DANS L'IMPLEMENTATION D'UN ATH-RA .....	66
FIGURE 3.1 LE POINT TANGENT DURANT LA NEGOCIATION DU VIRAGE (HOC ET AL., 2006) .....	73
FIGURE 3.2 ÉTUDE D'UN PROTOTYPE DE CALIBRATION D'UN ATH (CHARISSIS & NAEF, 2007) .....	79
FIGURE 3.3 EFFET VISUEL D'UNE ERREUR DE CALIBRATION OFFSET DE 2CM (CHARISSIS & NAEF, 2007) .....	79
FIGURE 3.4 PROJECTION TEMPS REEL EN FONCTION DE LA POSITION DE LA TETE ET DE LA DIRECTION DU REGARD (SHAHID ET AL., 2013) ..	80
FIGURE 3.5 ILLUSTRATION DES DIFFERENTES DISTANCES DE PROJECTION DE L'ATH-RA (CHARISSIS & NAEF, 2007) .....	81
FIGURE 4.1. PLATEFORME D'INTEGRATION IMMERSIVE P2I .....	85
FIGURE 4.2 SIMULATEUR DE CONDUITE CCARDS RENAULT .....	86
FIGURE 4.3 INTERFACE DU LOGICIEL DE SIMULATION SCANEr .....	86
FIGURE 4.4. LUNETTES 3D STÉRÉOSCOPIQUE ART (ADVANCED REAL-TIME TRACKING) .....	87
FIGURE 4.5 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'ART .....	88
FIGURE 5.1. ATH-RA CADRAGE DYNAMIQUE DES VEHICULES EN RA .....	95
FIGURE 5.2 ATH-RA CONDITION 2 « TRACKING OFF » .....	97
FIGURE 5.3. DIFFERENCE PERÇUE DANS LES DIFFERENTES SITUATIONS DE CONDUITE .....	99
FIGURE 5.4. DEGRE DE DIFFERENCE DE PRECISION ENTRE LES DEUX CONDUITES .....	100
FIGURE 5.5. ANALYSE DE LA PRECISION DE L'ATH-RA- CONDITION TRACKING OFF .....	101
FIGURE 5.6. ANALYSE DE LA PRECISION DE L'ATH-RA- CONDITION TRACKING ON .....	101
FIGURE 5.7. PARALLAXE DE MOUVEMENT CONDUCTEUR (CM) .....	103
FIGURE 5.8. SPIDER CHART DE LA PMC (CM) DURANT LES TACHES COMPLEMENTAIRES POUR LE GROUPE AVEC PREFERENCE POUR LA CONDITION TRACKING ON .....	104
FIGURE 5.9. MOYENNES PMC DURANT LES DEPASSEMENTS (CM) .....	104
FIGURE 5.10. MOYENNE DU TEMPS D'INTER-DISTANCE (S) .....	106
FIGURE 5.11. CORRELATION DU TEMPS D'INTER-DISTANCE ET PMC .....	106
FIGURE 5.12. ÉCART-TYPE DE VITESSE DURANT LES DEUX CONDITIONS EXPERIMENTALES (TRACKING ON / TRACKING OFF) .....	108
FIGURE 6.1. ATH-RA AUGMENTATION DES LIGNES DE MARQUAGE AU SOL .....	116
FIGURE 6.2 PROJECTION DE L'ATH-RA DANS LA SCENE DE CONDUITE DEVANT LE CONDUCTEUR .....	117
FIGURE 6.3 MOYENNES DES DIFFICULTES CONSTATEES .....	119
FIGURE 6.4 MOYENNES DE LA CAPACITE D'ASSOCIATION DU REEL-VIRTUEL .....	120
FIGURE 6.5 PRECISION DE L'ALIGNEMENT ATH-RA DURANT LES VIRAGES .....	121
FIGURE 6.6 PRECISION DE L'ALIGNEMENT DURANT LES LIGNES DROITES .....	123
FIGURE 6.7 MOYENNES DE DEGRE DE PREFERENCE POUR L'ATH-RA TRACKING ON .....	124
FIGURE 6.8 PARCOURS DE CONDUITE .....	129
FIGURE 6.9 LES TROIS ZONES D'AFFICHAGE ATH-RA A EVALUER .....	130
FIGURE 6.10 TRACKING ON & BV .....	131
FIGURE 6.11 TRACKING OFF & BV .....	131
FIGURE 6.12 TRACKING ON & MV .....	131
FIGURE 6.13 TRACKING OFF & MV .....	131
FIGURE 6.14. ÉVALUATION DE LA CAPACITE DE FOCALISATION DES SUJETS .....	132
FIGURE 6.15. ÉVALUATION DE LA NETTETE DES MARQUAGES RA .....	133
FIGURE 6.16. ÉVALUATION DE LA FACILITE DE CHANGEMENT DE LA DIRECTION DU REGARD .....	134
FIGURE 6.17. ÉVALUATION DE LA FREQUENCE D'APPARITION DES IMAGES DOUBLES .....	135
FIGURE 6.18. ÉVALUATION DE LA CAPACITE D'ADAPTATION A L'ATH-RA .....	136
FIGURE 6.19. ÉVALUATION DE LA CAPACITE DE DISTINCTION DES MARQUAGES AU SOL REEL DES MARQUAGES EN RA SUR L'ATH .....	137
FIGURE 6.20. ÉVALUATION DE LA PRECISION DE L'ALIGNEMENT ENTRE LA RA ET L'INFORMATION DE LA SCENE DE CONDUITE .....	138
FIGURE 6.21. ÉVALUATION DE LA PERTINENCE DE L'AIDE DURANT LES DIFFERENTES CONDITIONS EXPERIMENTALES .....	139
FIGURE 6.22. ÉVALUATION DE LA CAPACITE DE MAITRISE DE LA TRAJECTOIRE DU VEHICULE .....	140
FIGURE CG.1 CONFLIT ACCOMMODATION-CONVERGENCE AVEC UN ATH-RA DANS DIFFERENTS CAS .....	146
FIGURE CG.2 SIMULATION D'UN ATH-RA ET CONFLIT ACCOMMODATION-CONVERGENCE .....	146
FIGURE A.1: ILLUSTRATION DU VEHICULE DE GENDARMERIE A SUIVRE .....	173

FIGURE 0.2: BOUTON D'ACTIVATION POUR DEMARRER LE MOTEUR.....	174
FIGURE 0.3: ILLUSTRATION DE LA MANIPULATION SUR LA PALETTE DE DROITE.....	174



# Annexe 1 « Fiche de présentation expérimentale »

## Comparaison de deux systèmes d’affichage réalité augmentée (RA) pour l’aide avancée à la conduite (ADAS)

### I - Objet de l’étude

Un dispositif d’aide à la conduite consistant à entourer les voitures devant le conducteur (dans la même voie ou non), durant des conditions de visibilité réduites (temps sombre et nuageux), est actuellement à l’étude.

Cet affichage supplémentaire est réalisé en utilisant un plan virtuel (Virtual Head-Up Display) sur lequel sont projetées les informations.

Cette expérimentation vise à comparer deux approches pour le calcul de cet affichage. On vous demandera d’évaluer ces deux prototypes par rapport à la précision de l’affichage, c’est-à-dire l’alignement du rectangle avec la voiture concernée.

La distance d’affichage du plan virtuel est fixée à 3 mètres, et il n’y a pas de code couleur associé au danger que représente le véhicule.

Ci-dessous une image illustrant cet affichage supplémentaire.



Figure a1.2 Affichage HUD Virtuel «encadrement des voitures devant le conducteur»

### II - Simulateur de conduite P2I (Plateforme d’Intégration Immersive)

Cette expérimentation se déroule sur le simulateur P2I (Plateforme d’Intégration Immersive).

#### *Caractéristiques*

#### *Informations générales*

<i>Type de simulateur</i>	<i>Simulateur statique (pas de mouvement physique)</i>

<i>Surface de projection</i>	4 faces de dimensions 3 m x 2.5 m
<i>Affichage</i>	Stéréoscopique (3D)
<i>Résolution</i>	1024 x 768 par face
<i>Système de capture de mouvements</i>	4 caméras infrarouges Tracking ART (sur support de conduite et les lunettes)

### III - Déroulement de l'expérimentation

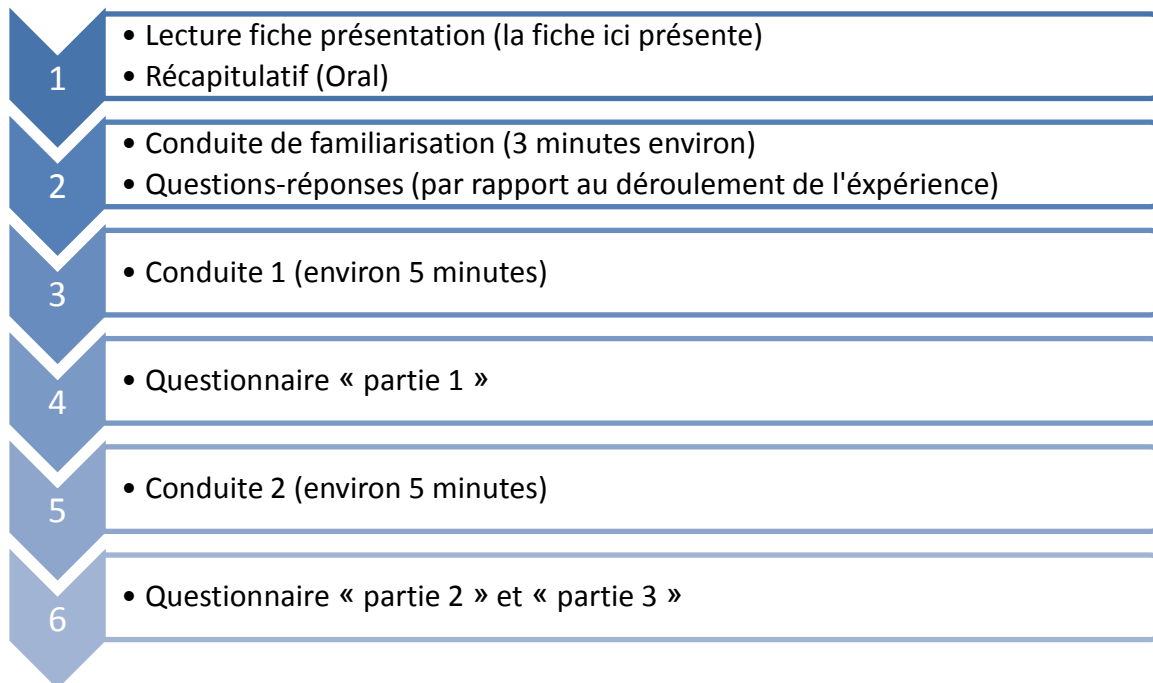
Après avoir lu la présente fiche de présentation et que l'expérimentateur vous aura fait un récapitulatif oral des principales informations s'y trouvant, l'expérimentation proprement dite commencera.

Tout d'abord une conduite de familiarisation (3 min environ) vous permettra de prendre en main le simulateur et de découvrir l'environnement virtuel dans lequel se déroulera l'expérimentation. Au besoin, l'expérimentateur pourra répondre à vos questions ou vous apporter les précisions nécessaires.

Vous conduirez ensuite le simulateur 2 fois : une avec chaque système. A l'issue de la première conduite, vous répondrez à la première partie du questionnaire. Et à l'issue de la deuxième conduite, vous répondrez à la deuxième partie du questionnaire.

Enfin, on vous demandera de répondre à la 3<sup>ème</sup> partie du questionnaire portant sur la comparaison des deux parcours en termes de précision de l'affichage et sur votre préférence entre les deux systèmes.

Ci-dessous un récapitulatif des différentes étapes de l'expérimentation :



La durée totale de l'expérimentation est de 30 minutes environ, en incluant toute les étapes.

## IV - Consignes

### 1- Tâche principale

Il vous est demandé de suivre le véhicule de gendarmerie se trouvant directement devant vous au démarrage (dont l'image se trouve ci-dessous). Il ne commence à rouler que lorsque vous aurez démarré votre véhicule et commencé à rouler.



Figure a.1: illustration du véhicule de gendarmerie à suivre

## 2- Démarrage

Pour démarrer le véhicule :

- 1 - Appuyez sur le bouton rouge à droite (comme indiqué sur l'image) pour démarrer le moteur



*Figure 0.2: Bouton d'activation pour démarrer le moteur*

- 2 - Tirez (ramenez vers vous) la palette de droite derrière le volant 3 fois de suite, le sens est indiqué par la flèche dans l'image.



*Figure 0.3: illustration de la manipulation sur la palette de droite*

- 3 - Accélérez et roulez normalement en considérant que la boîte de vitesses est automatique (ne pas utiliser la pédale d'embrayage)

Si vous voyez que la voiture part en marche arrière lorsque vous accélérez, tirez une fois de plus la palette de droite derrière le volant pour aller en marche avant.

### 3- Tâches complémentaires durant la conduite

Durant la conduite, deux tâches complémentaires vous seront demandées. Il n'y a pas de contrainte de temps pour leur réalisation. Toutefois n'oubliez pas de garder un œil sur la route comme si vous étiez en conduite réelle !

**Tâche 1 :** Lorsque vous entendrez la sonnerie du téléphone, prenez le téléphone se trouvant sur le siège passager à votre droite, faites comme si vous regardiez qui appelle, raccrochez et enfin reposez le téléphone sur le siège passager.

**Tâche 2 :** Lorsque vous entendrez le bip sonore, faites comme si vous ouvriez la boîte à gants, regardez si un objet se trouve à l'intérieur et enfin refermez-la. L'affichage stéréoscopique vous permet de visualiser le tableau de bord et l'intérieur de la voiture, vous pourrez donc voir l'emplacement de la boîte à gant virtuelle.

### 4- Autres informations

- Conduisez normalement (comme si vous étiez dans votre voiture) tout en respectant le code de la route
- La ligne séparatrice est une ligne continue. Toutefois, si à des moments vous estimez qu'il faut dépasser le véhicule devant vous et que vous estimez que vous en avez la possibilité (comme en conduite réelle), vous êtes autorisé(e) à le faire. (agissez comme si la ligne était discontinue)
- Il n'y a pas de bouton physique pour le clignotant
- Si vous avez des questions sur le déroulement de l'expérience vous pouvez demander des clarifications avant ou après chaque parcours.
- Pour les autres questions concernant les objectifs de l'étude, vous pourrez les poser à la fin de l'expérimentation.
- Les résultats de l'étude pourront vous être transmis si vous le souhaitez.

## V - Mal du simulateur

Si jamais vous ressentez un malaise quelconque (nausée, maux de tête, ou autres symptômes) à n'importe quel stade de l'expérimentation, veuillez en informer l'expérimentateur assez rapidement. Vous pouvez, bien évidemment, décider d'arrêter l'expérience à tout moment.





## Annexe 2 « Questionnaire Expérimental 1 »

### Identification

Sujet N° :	
Age :	
Sexe :	

### Expérience de conduite

Année d'obtention de votre permis de conduire :

Combien de kilomètres environ faites-vous en voiture chaque année ?

- Moins de 4000 Km
- Entre 4000 km et 8000 Km
- Plus de 8000 Km

### Expérience de conduite sur un simulateur de conduite

Combien de fois avez-vous conduit un simulateur de conduite (ou jeux de simulation avec un volant) ?

- Jamais
- Une ou deux fois
- Trois fois ou plus

En conduite réelle, vous arrive-t-il de faire une tâche secondaire (comme fumer, manger, utiliser un téléphone...) ?

- Jamais
- Rarement
- De temps en temps
- Assez souvent
- Très souvent

En conduite réelle, effectuer une tâche secondaire vous perturbe :

- Pas du tout
- Un peu
- Moyennement
- Beaucoup

En conduite réelle, diriez-vous que vous respectez les distances de sécurité ?

- Jamais
- Rarement
- De temps en temps
- Assez souvent
- Très souvent

## CONDUITE N°../2

Configuration (à remplir par l'expérimentateur) :

Durant la conduite, avez-vous eu le sentiment de mal du simulateur ?

Sentiment de mal du simulateur	Si oui, dans quel(s) cas	Si oui, les cause(s) selon vous
<input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> OUI Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas : <input type="checkbox"/> Très faible <input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Fort <input type="checkbox"/> Très fort	<input type="checkbox"/> Dans les intersections <input type="checkbox"/> Dans les virages <input type="checkbox"/> En ligne droite <input type="checkbox"/> Durant les dépassements <input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires <input type="checkbox"/> Durant tout le parcours	<input type="checkbox"/> Je ne sais pas <input type="checkbox"/> Simulation de façon générale <input type="checkbox"/> Affichage d'aide à la conduite (encadrement des voitures) <input type="checkbox"/> Autre(s) à préciser :

Durant la conduite, avez-vous eu un problème de focalisation?

Problème de focalisation	Si oui, dans quel(s) cas	Si oui, les cause(s) selon vous
<input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> OUI Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas : <input type="checkbox"/> Très faible <input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Fort <input type="checkbox"/> Très fort	<input type="checkbox"/> Dans les intersections <input type="checkbox"/> Dans les virages <input type="checkbox"/> En ligne droite <input type="checkbox"/> Durant les dépassements <input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires <input type="checkbox"/> Durant tout le parcours	<input type="checkbox"/> Je ne sais pas <input type="checkbox"/> Simulation de façon générale <input type="checkbox"/> Affichage d'aide à la conduite (encadrement des voitures) <input type="checkbox"/> Autre(s) à préciser :

Durant la conduite, avez-vous distingué à quel véhicule est associé l'encadrement (quel véhicule a été entouré)?

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aucune fois (pour aucune voiture)	Rarement (pour quelques cas seulement)	Souvent (pour la majorité des cas)	Tout le temps (pour toutes les voitures)

Durant la conduite, comment qualifieriez-vous l'alignement du rectangle par rapport à la voiture concernée dans les cas suivants ?

*Dans les intersections :*

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très imprécis	Imprécis	Précis	Très précis

*Dans les virages :*

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très imprécis	Imprécis	Précis	Très précis

*En ligne droite :*

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très imprécis	Imprécis	Précis	Très précis

*Durant les dépassements :*

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très imprécis	Imprécis	Précis	Très précis

*Durant la réalisation des tâches secondaires :*

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très imprécis	Imprécis	Précis	Très précis

*Durant tout le parcours :*

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très imprécis	Imprécis	Précis	Très précis

Concernant l’affichage d’aide à la conduite (encadrement des voitures), avez-vous eu durant la conduite les difficultés listées ci-dessous ?

Difficulté(s) rencontrée(s) liée(s) à l’affichage RA	Si oui, dans quel(s) cas
<p>Gêne sur la perception de l’environnement de conduite (véhicules, routes, croisements...)</p> <p><input type="checkbox"/> NON</p> <p><input type="checkbox"/> OUI</p> <p>Si, « OUI » cochez l’une des cases qui correspond au mieux à votre cas :</p> <p><input type="checkbox"/> Très faible</p> <p><input type="checkbox"/> Faible</p> <p><input type="checkbox"/> Moyen</p> <p><input type="checkbox"/> Fort</p> <p><input type="checkbox"/> Très fort</p>	<p><input type="checkbox"/> Dans les intersections</p> <p><input type="checkbox"/> Dans les virages</p> <p><input type="checkbox"/> En ligne droite</p> <p><input type="checkbox"/> Durant les dépassements</p> <p><input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires</p> <p><input type="checkbox"/> Durant tout le parcours</p>
Difficulté(s) rencontrée(s) liée(s) à l’affichage RA	Si oui, dans quel(s) cas
<p>Perturbation de la tâche de conduite (maîtrise de la trajectoire, maintien de l’inter-distance, freinage...)</p> <p><input type="checkbox"/> NON</p> <p><input type="checkbox"/> OUI</p> <p>Si, « OUI » cochez l’une des cases qui correspond au mieux à votre cas :</p> <p><input type="checkbox"/> Très faible</p> <p><input type="checkbox"/> Faible</p> <p><input type="checkbox"/> Moyen</p> <p><input type="checkbox"/> Fort</p> <p><input type="checkbox"/> Très fort</p>	<p><input type="checkbox"/> Dans les intersections</p> <p><input type="checkbox"/> Dans les virages</p> <p><input type="checkbox"/> En ligne droite</p> <p><input type="checkbox"/> Durant les dépassements</p> <p><input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires</p> <p><input type="checkbox"/> Durant tout le parcours</p>

Difficulté(s) rencontrée(s) liée(s) à l'affichage RA	Si oui, dans quel(s) cas
<p>Sentiment de mal du simulateur</p> <p><input type="checkbox"/> NON</p> <p><input type="checkbox"/> OUI</p> <p>Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :</p> <p><input type="checkbox"/> Très faible</p> <p><input type="checkbox"/> Faible</p> <p><input type="checkbox"/> Moyen</p> <p><input type="checkbox"/> Fort</p> <p><input type="checkbox"/> Très fort</p>	<p><input type="checkbox"/> Dans les intersections</p> <p><input type="checkbox"/> Dans les virages</p> <p><input type="checkbox"/> En ligne droite</p> <p><input type="checkbox"/> Durant les dépassements</p> <p><input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires</p> <p><input type="checkbox"/> Durant tout le parcours</p>
Difficulté(s) rencontrée(s) liée(s) à l'affichage RA	Si oui, dans quel(s) cas
<p>Sentiment de fatigue visuelle</p> <p><input type="checkbox"/> NON</p> <p><input type="checkbox"/> OUI</p> <p>Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :</p> <p><input type="checkbox"/> Très faible</p> <p><input type="checkbox"/> Faible</p> <p><input type="checkbox"/> Moyen</p> <p><input type="checkbox"/> Fort</p> <p><input type="checkbox"/> Très fort</p>	<p><input type="checkbox"/> Dans les intersections</p> <p><input type="checkbox"/> Dans les virages</p> <p><input type="checkbox"/> En ligne droite</p> <p><input type="checkbox"/> Durant les dépassements</p> <p><input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires</p> <p><input type="checkbox"/> Durant tout le parcours</p>
Difficulté(s) rencontrée(s) liée(s) à l'affichage RA	Si oui, dans quel(s) cas
<p>Augmentation de la charge mentale (demande d'attention et effort mental)</p> <p><input type="checkbox"/> NON</p> <p><input type="checkbox"/> OUI</p> <p>Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :</p> <p><input type="checkbox"/> Très faible</p> <p><input type="checkbox"/> Faible</p> <p><input type="checkbox"/> Moyen</p> <p><input type="checkbox"/> Fort</p> <p><input type="checkbox"/> Très fort</p>	<p><input type="checkbox"/> Dans les intersections</p> <p><input type="checkbox"/> Dans les virages</p> <p><input type="checkbox"/> En ligne droite</p> <p><input type="checkbox"/> Durant les dépassements</p> <p><input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires</p> <p><input type="checkbox"/> Durant tout le parcours</p>

Difficulté(s) rencontrée(s) liée(s) à l'affichage RA	Si oui, dans quel(s) cas
<p>Autre (à préciser) :</p> <p>Si, « AUTRE » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :</p> <p><input type="checkbox"/> Très faible</p> <p><input type="checkbox"/> Faible</p> <p><input type="checkbox"/> Moyen</p> <p><input type="checkbox"/> Fort</p> <p><input type="checkbox"/> Très fort</p>	<p><input type="checkbox"/> Dans les intersections</p> <p><input type="checkbox"/> Dans les virages</p> <p><input type="checkbox"/> En ligne droite</p> <p><input type="checkbox"/> Durant les dépassements</p> <p><input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires</p> <p><input type="checkbox"/> Durant tout le parcours</p>

## Comparaison des deux conduites

Concernant l'alignement du rectangle par rapport à la voiture concernée, avez-vous constaté une différence entre les deux conduites dans les cas suivants ?

*Dans les intersections :*

NON

OUI

Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :

Faible différence

Forte différence

*Dans les virages :*

NON

OUI

Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :

Faible différence

Forte différence

*En ligne droite :*

NON

OUI

Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :

Faible différence

Forte différence

*Durant les dépassements :*

NON

OUI

Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :

Faible différence

Forte différence

*Durant la réalisation des tâches secondaires :*

NON

OUI

Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :

Faible différence

Forte différence



*De façon générale durant tout le parcours :*

NON

OUI

Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :

Faible différence

Forte différence

Dans le(s) cas ou vous avez constaté une imprécision au niveau de l'alignement, à quel moment l'avez-vous constaté ou lors de quel évènement ?

- .....
- .....

Dans le(s) cas ou vous avez constaté une imprécision au niveau de l'alignement, ce décalage a-t-il modifié votre comportement durant la conduite ?

Modification du comportement durant la conduite	Si oui, dans quel(s) cas
Diminution de la vitesse (décélération) <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> OUI Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas : <input type="checkbox"/> Très faible <input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Fort <input type="checkbox"/> Très fort	<input type="checkbox"/> Dans les intersections <input type="checkbox"/> Dans les virages <input type="checkbox"/> En ligne droite <input type="checkbox"/> Durant les dépassements <input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires <input type="checkbox"/> Durant tout le parcours
Modification du comportement durant la conduite	Si oui, dans quel(s) cas
Effort d'ajustement de la tête (pour bien voir l'encadrement sur le véhicule) <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/> OUI Si, « OUI » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas : <input type="checkbox"/> Très faible <input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Fort <input type="checkbox"/> Très fort	<input type="checkbox"/> Dans les intersections <input type="checkbox"/> Dans les virages <input type="checkbox"/> En ligne droite <input type="checkbox"/> Durant les dépassements <input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires <input type="checkbox"/> Durant tout le parcours

Modification du comportement durant la conduite	Si oui, dans quel(s) cas
Autre(s) à préciser : Si, « AUTRE » cochez l'une des cases qui correspond au mieux à votre cas :	<input type="checkbox"/> Dans les intersections
<input type="checkbox"/> Très faible	<input type="checkbox"/> Dans les virages
<input type="checkbox"/> Faible	<input type="checkbox"/> En ligne droite
<input type="checkbox"/> Moyen	<input type="checkbox"/> Durant les dépassements
<input type="checkbox"/> Fort	<input type="checkbox"/> Durant la réalisation des tâches secondaires
<input type="checkbox"/> Très fort	<input type="checkbox"/> Durant tout le parcours

Quel est le système que vous préférez ?

- Premier système
- Deuxième système
- Pas de préférence

Pour quelle(s) raison(s) ?

- 
- 

Comment qualifieriez-vous cette préférence ?





Légère préférence

Forte préférence

Durant l'expérimentation, comment évaluez-vous votre degré d'immersion par rapport à une conduite réelle ?





Pas d'immersion

Très fort

En conduite réelle, quelles sont les situations qui vous amènent à déplacer votre tête ?

- 
- 
- 

Remarque(s) : (si vous avez des commentaires ou des constatations à partager)



## Annexe 3 « Questionnaire Expérimental 2 »

### Évaluez les paramètres suivant pendant la conduite sur une échelle de 0 = pas du tout à 20 = très bien / très souvent

Pour les zones 1, 2 et 3 regarder l'image ci-dessous

1) Comment estimez-vous la facilité de focalisation sur les marquages rouges réalité augmentée ? (mise au point) (pas facile=0, très facile=20)

Zone proche

Zone

Zone loin

Sujet

Conduite N° :

2) Comment qualifiez-vous la netteté des marquages réalité augmentée affichées en rouge ? (pas nette=0, très

Zone proche

Zone

Zone loin

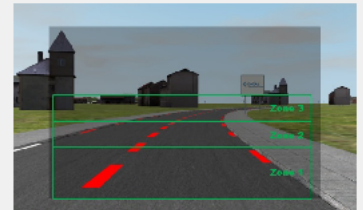
3) Comment estimez-vous la facilité du changement de point de vue de la RA (marquages aux sols rouges) aux autres éléments dans la scène de conduite et inversement ? (pas facile =0, très facile=20)

4) Avez-vous vu des images doubles ? (pas d'images doubles=0, images doubles très fréquentes=20)

Zone proche

Zone

Zone loin 3



5) Comment estimez-vous votre adaptation à l'affichage réalité augmentée ? (pas d'adaptation=0, très bonne adaptation=20)

6) A quel point avez-vous distingué les marquages RA (en rouge) des marquages blancs réels ?

(pas de distinction/marquages blancs non visibles=0, très bonne distinction=20)

7) Comment qualifiez-vous l'alignement des marquages RA (en rouge) avec les marquages réels ? (pas du tout alignés=0, très bien alignés=20)

Zone proche

Zone

Zone loin 3

8) Comment évaluez-vous la pertinence de l'aide fournie avec les marquages RA rouge pour la maîtrise de la trajectoire du véhicule ? (pas du tout pertinent=0, très pertinent=20)

9) Comment estimez-vous la maîtrise de la trajectoire du véhicule durant ce parcours ? (pas de maîtrise=0, très bonne maîtrise=20)

Terminer



## Annexe 4 « Nomenclature & Abréviations »

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
ABS	Anti-lock Braking System
ACC	Adaptative Cruise Control
ADAS	Terminologie anglaise « Advanced Driver Assistance System - ADAS», qui désigne un système avancé d'aide à la conduite
AR-HUD / ATH-RA	Interface dédiée au conducteur d'un véhicule dans le domaine de l'automobile. Dénomination en français : « Affichage Tête Haute- Réalité Augmentée ». Appelée en anglais : Augmented Reality- Head Up Display (AR-HUD). En français ATH-RA
CSC	Canal Semi-Circulaire (au niveau de l'oreille interne 3 CSC)
Euro NCAP	«European New Car Assesment Program » en anglais. C'est un système européen pour l'évaluation des véhicules
FOV	Field Of View en anglais, expression utilisée pour indiquer le champ de vision
HDD	De l'anglais « Head Down Dipslay », il s'agit d'un Affichage Tête Basse par opposition au dispositif d'Affichage Tête Haute.
HMD	Head Mounted Display
HMI	Human Machine Interface, expression anglaise qui désigne une Interface Homme Machine
HMPD	Head Mounted Projective Display en anglais, qui signifie affichage avec projection sur un dispositif porté sur la tête
ISO	International Standard Organisation
La cobotique	Néologisme de « coopération » et « robotique » pour désigner la robotique collaborative
MRT	Expression anglaise « Multiple Ressource Theory ». C'est la théorie des ressources multiples.
NHTSA	Acronyme anglais de « National Highway Traffic Safety Administration». C'est l'agence américaine chargée de la sécurité routière
OpenGL	C'est une librairie graphique pour le développent en infographie, utilisé pour construire des images 3D
Pitch	Mouvement de tangage

PMC	Abréviation pour Parallaxe de Mouvement Conducteur, utilisée dans ce manuscrit pour désigner un mouvement de translation du conducteur, générant une erreur de perception RA dû à l'effet parallaxe lors de l'utilisation d'un ATH-RA (où l'information est toujours affichée à la même position)
PSM	Parking Slot Measurement
RA	La Réalité Augmentée (RA) est la projection d'informations virtuelles sur l'environnement réel.
RM	La Réalité Mixte (RM) est le mélange d'informations réelles et virtuelles.
Roll	Mouvement de roulis
RV	La Réalité Virtuelle (RV) est un environnement de synthèse d'images virtuelles.
SAE International	C'est l'association internationale des ingénieurs de l'automobile
SAS	Expression anglaise « Simulation Adaptation Syndrome ». C'est le syndrome d'adaptation à la simulation.
SCANeR	Logiciel appartenant à Oktal et Renault, il est dédié à la simulation de conduite.
SRR/ SWRR	De l'anglais "Steering Wheel Reversal Rate", c'est l'expression anglaise qui désigne la fréquence des actions du conducteur sur le volant.
SWAT	De l'anglais « Subjective Workload Assessment Technique ». C'est une technique de mesure de la charge mentale.
THW / Inter-distance	De l'anglais "Time Head Way", il s'agit d'une distance inter-véhiculaire exprimée en temps.
TLC	De l'anglais "Time to Lane Crossing", c'est le temps restant avant de franchir le bord de la voie de circulation si aucune action de correction n'est entreprise.
Tracking ON	Expression anglaise pour indiquer que le suivi est activé. Dans ce manuscrit il s'agit de l'activation du suivi des mouvements de tête à l'aide d'un système d'ART Tracking, pour une mise à jour temps réel d'affichage RA.
Tracking OFF	Expression anglaise pour indiquer que le suivi est désactivé. Dans ce manuscrit il s'agit de la désactivation du suivi des mouvements de tête à l'aide d'un système d'ART Tracking. L'affichage RA reste fixe par rapport à la position centrale initiale mesurée.

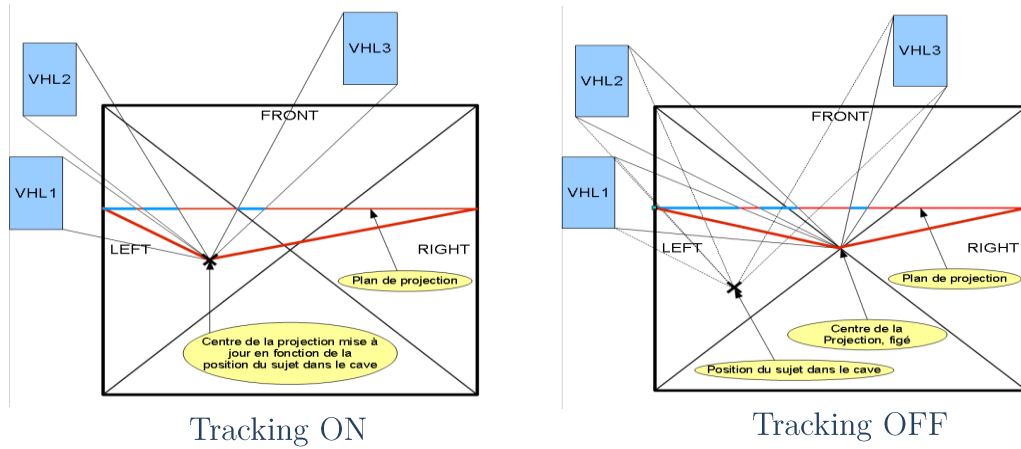
TTC	La terminologie anglaise « Time To Collision », est utilisée pour indiquer le temps restant avant de franchir le bord de la voie de circulation si aucune action n'est entreprise.
UCD/ CCU	Méthode ergonomique appelée en français « Conception Centrée sur l'Utilisateur », et en anglais « User Centered Design – UCD ».
VRD	Virtual Retinal Display en anglais, qui veut dire: affichage par projection sur la rétine
WP	De l'anglais « Workload Profile ». C'est un indice de mesure de la charge mentale.
Yaw	Mouvement de lacet



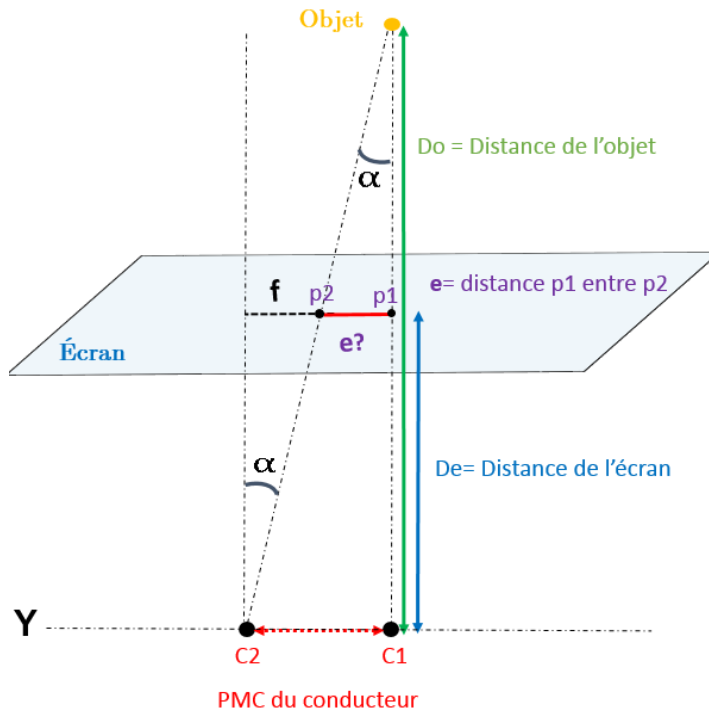


## Annexe 5 « Analyses Complémentaires »

### I - Comparaison des conditions « Tracking ON » et Tracking OFF »

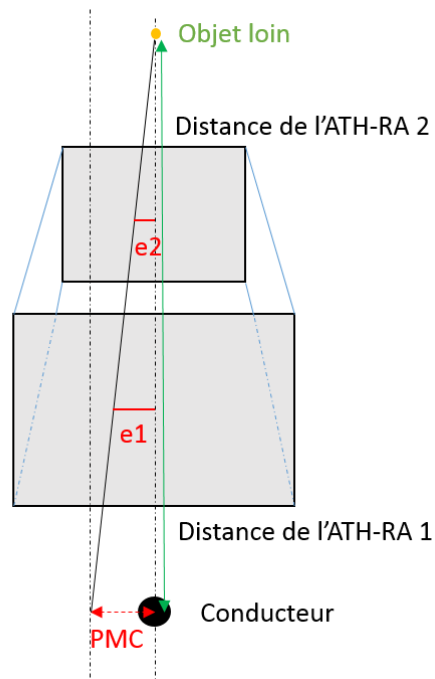


### II - Calcul de l'erreur générée sur écran



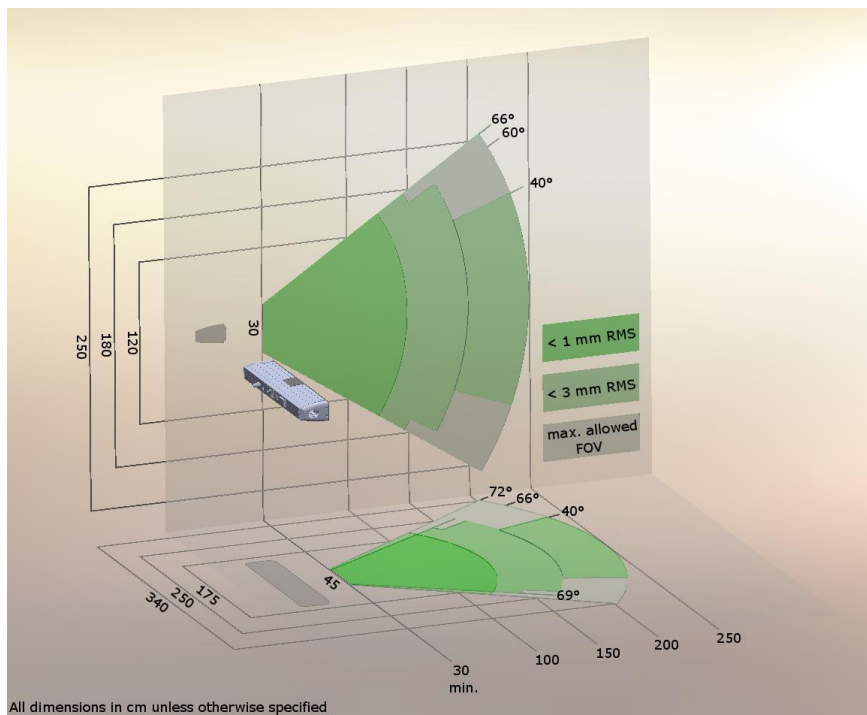
$$e = PMC - \frac{PMC \cdot De}{Do}$$

### III - Variation de l'erreur générée en fonction de la distance de projection



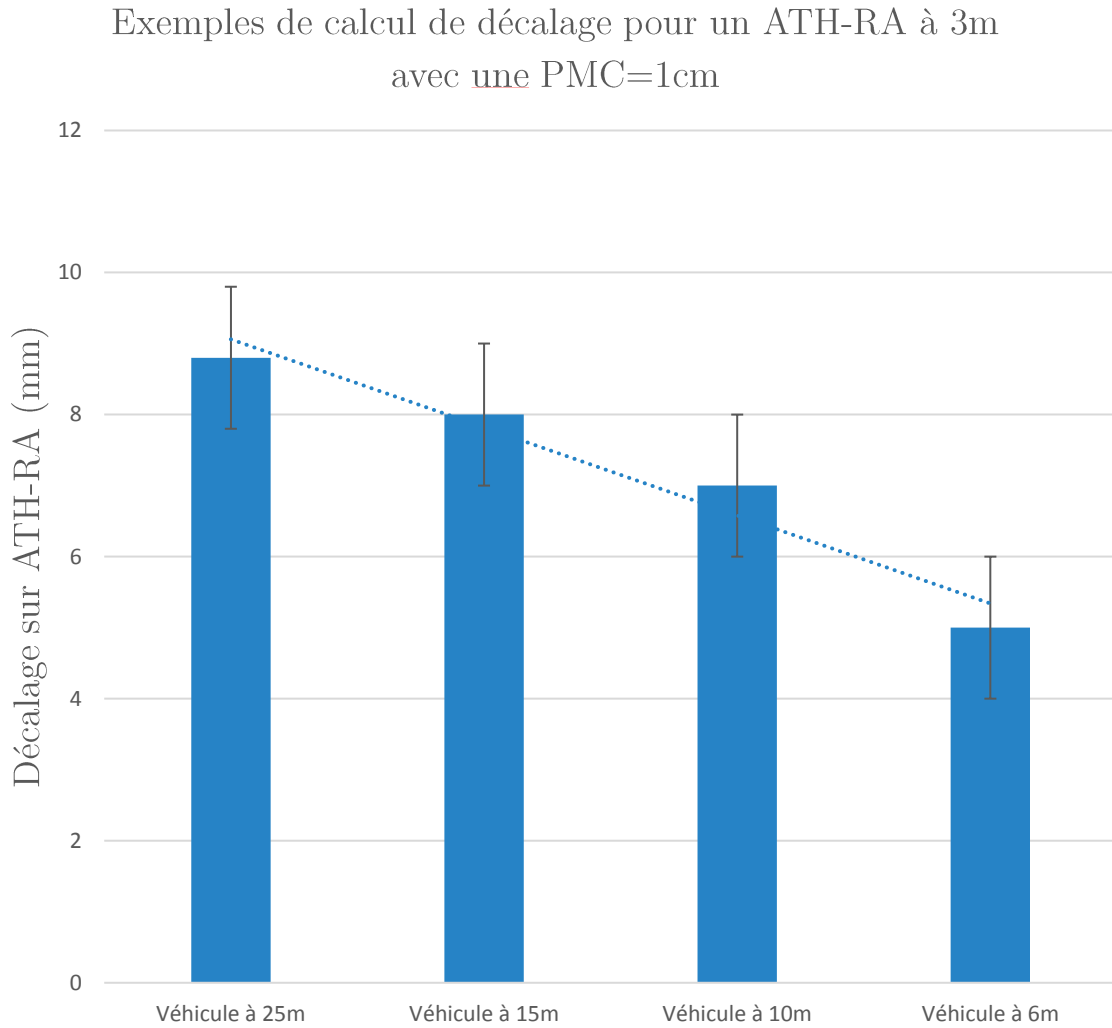
### IV - Précision du système de suivi de tête « ART-Tracking »

L'erreur de Tracking est de <1 mm rms pour la zone de déplacement de la tête du conducteur.



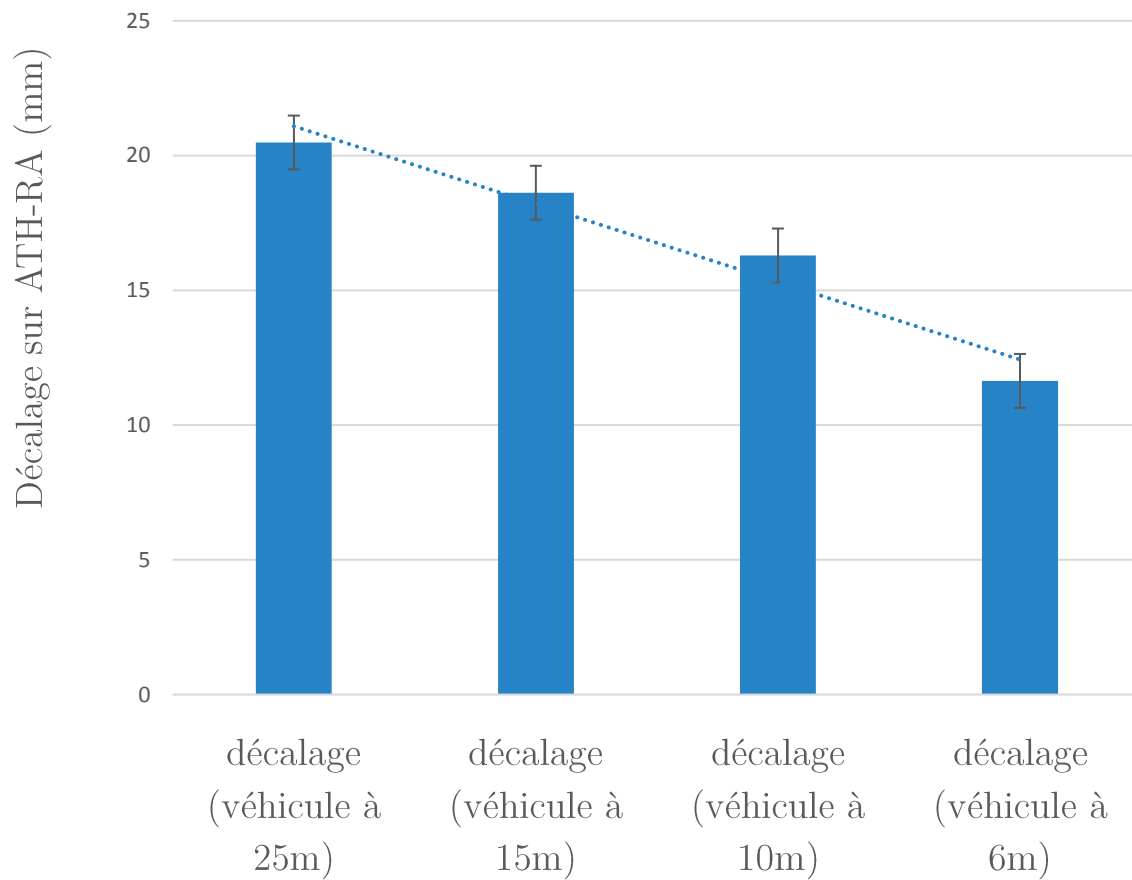
## V - Quelques exemples

L'erreur d'alignement engendré sur écran lors de l'utilisation d'un ATH-RA en condition Tracking OFF est calculée en figeant la distance du véhicule lièvre à différentes positions.



Décalage avec la variation de la distance du véhicule

Exemples de calcul de décalage pour un ATH-RA à 3m  
avec la PMC Moyenne du Groupe Préférence Tracking  
ON (PMC=2,32cm)



Variation de la distance du véhicule









## Résumé

L’Affichage Tête Haute (ATH) est la solution émergente pour l’aide visuelle à la conduite automobile, surtout dans certaines conditions de visibilité réduite par un temps dégradé ou une route mal éclairée. Le dispositif ATH permet de projeter des informations virtuelles, directement dans le champ de vision central de la scène de conduite, sans détournement du regard de la route. La perception visuelle du conducteur est ainsi augmentée avec une coexistence entre le réel et le virtuel. Cependant pour garantir la bonne perception de ces informations virtuelles et permettre aux conducteurs d’engager les actions appropriées au bon moment, il est nécessaire d’assurer un paramétrage optimal. Ce projet de thèse se consacre à l’étude de trois facteurs majeurs : (1) la Parallaxe de Mouvement du Conducteur – PMC, (2) la distance de projection de la RA, (3) la condition de visibilité. Nous proposons une approche expérimentale progressive avec l’introduction d’un facteur à chaque expérimentation. Deux métaphores visuelles RA pour l’aide à la conduite primaire ont été spécialement conçues. Trois expérimentations ont été menées sur sujets réels dans les simulateurs de conduite de Renault. L’ATH-RA a été simulé virtuellement et intégré à l’environnement virtuel de conduite. Ce qui a permis la réalisation d’études subjectives et objectives, afin d’étudier progressivement : l’impact de la PMC, le lien avec la distance de projection, et l’influence des conditions de visibilité. Dans ce travail pluridisciplinaire, nous tentons de comprendre comment les informations Réalité Augmentée sont perçues par le conducteur ainsi que l’influence sur le comportement et les performances durant la conduite, afin de proposer des préconisations sur les paramètres d’un ATH-RA.

**Mots- clés :** Affichage Tête Haute - Réalité Augmentée (ATH-RA), Parallaxe de Mouvement Conducteur (PMC), Simulation Virtuelle, Simulation de Conduite Automobile, Aide Visuelle à la Conduite Automobile

## Abstract

Head-Up Display is the emerging solution for visual aid while driving a car, especially during reduced visibility conditions, like bad weather or when the road is poorly lighted. The HUD device allows to project virtual information in the central field of view of the driving scene, without distracting driver’s eyes off the road. The visual perception of the driver is therefore augmented, with a coexistence between the real and virtual world. However, it is necessary to ensure an optimal setting in order to guarantee the good perception of the virtual information, and allow drivers to take appropriate actions at the right moment. This thesis project is dedicated to study three important parameters: (1) The Driver Head Motion Parallax, (2) AR projection distance, (3) visibility conditions. An experimental approach has been implemented, with the selection of two AR visual metaphors for driving aid. Three experimentations with real subjects have been realized in Renault’s driving simulators, where the three factors have been integrated progressively. The AR-HUD was simulated virtually and embedded in the virtual driving scene. This allowed to realize subjective and objective analysis to progressively study: the impact of the PMC, the link with the projection distance, and the influence of visibility conditions. The aim of this multidisciplinary work is an attempt to understand how AR information is perceived by the driver, and the influence on driver behaviour and performance.

**Keywords:** Augmented Reality – Head-Up Display (AR-HUD), Driver Head Motion Parallax (HMP), Virtual Simulation, Car Driving Simulation, Visual Aid for Car Driving