

Ecole Doctorale Multidisciplinaire Jean Henri Lambert
Sciences Dures

THÈSE

Présentée pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE HAUTE-ALSACE

[arrêté ministériel du 30 mars 1992]

Spécialité : **Automatique et Informatique Industrielle**

par

Benazouz BRADAI

Optimisation des Lois de Commande d'Éclairage Automobile par Fusion de Données

Soutenue publiquement le 20 Septembre 2007 devant la commission d'examen composée de :

M. Didier MAQUIN	Professeur à l'INPL – Nancy	Rapporteur
M. Dominique MEIZEL	Professeur à l'ENSI de Limoges	Rapporteur
M. Bernard KEITH	Professeur à l'INSA de Strasbourg	Examineur
M. Gérard GISSINGER	Professeur à l'ENSISA – UHA	Examineur
M. Michel BASSET	Professeur à l'ENSISA – UHA	Directeur de thèse
M. Jean-Philippe LAUFFENBURGER	MdC à l'ENSISA – UHA	Co-Encadrant de thèse
M. Philippe GOUGEON	Program Director du DAD– Valeo	Membre invité
Mme Anne HERBIN-SAHLER	Project Leader au DAD – Valeo	Membre invité

Laboratoire : Modélisation Intelligence Processus Systèmes (MIPS)

Equipe : Modélisation et Identification en Automatique et Mécanique - Cellule Automatique & Automobile

Table des matières

RÉSUMÉ.....	11
ABSTRACT	13
RÉFÉRENCES PERSONNELLES	14
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	17
SÉCURITÉ ROUTIÈRE	17
CAUSES DES ACCIDENTS	17
CONDUITE NOCTURNE, VISIBILITÉ ET ACCIDENTS	17
L'ÉCLAIRAGE AUTOMOBILE	18
<i>Eclairage conventionnel</i> :.....	18
<i>Eclairage directionnel</i> :.....	18
NOUVELLES TECHNOLOGIES POUR L'ÉCLAIRAGE ET POUR ADAS	18
CAPTEURS VIRTUELS ET FUSION DE DONNÉES POUR ADAS :	19
PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE	19
ORGANISATION DU DOCUMENT	20
<i>Première partie (chapitres 1 et 2) : contexte</i>	20
<i>Deuxième partie (chapitres 3 et 4) : capteurs virtuels pour le projet NAFS</i>	20
<i>Troisième partie (chapitre 5) : mise en œuvre expérimentale et résultats</i>	21
1. CHAPITRE 1 : ASSISTANCE À LA CONDUITE : NOTIONS DE SÉCURITÉ ET DE CONFORT	
ROUTIERS	23
1.1. INTRODUCTION	23
1.2. SÉCURITÉ ROUTIÈRE	23
1.3. RATIO SÉCURITÉ – CONFORT	25
1.4. NOUVELLES TECHNOLOGIES POUR LA SÉCURITÉ ET LE CONFORT	25
1.5. APPORTS DES SYSTÈMES D'ASSISTANCE À LA CONDUITE.....	26
1.5.1. <i>Besoins du conducteur</i>	26
1.5.2. <i>Assistance et niveaux de sécurité</i>	27
1.5.3. <i>L'assistance dans le système « Conducteur-Véhicule-Environnement »</i>	28
1.5.3.1. Niveaux d'assistance	29
1.5.3.2. Coopération Conducteur – Système d'assistance	29
1.5.4. <i>Exemples d'assistances</i>	30
1.5.4.1. Assistances à la perception	30
1.5.4.2. Assistances actives	31
1.5.5. <i>L'entité en charge de la conduite</i>	32
1.5.5.1. Le conducteur au cœur du développement.....	32
1.5.5.2. Etude du conducteur	32
1.5.6. <i>Les impacts de l'assistance sur le conducteur</i>	39
1.5.6.1. La prise de risque	39
1.5.6.2. L'acceptabilité d'assistance	40
1.5.7. <i>Intérêts des capteurs virtuels pour l'assistance à la conduite</i>	40
1.5.8. <i>Conclusion</i>	41
2. CHAPITRE 1 : LE PROJET NAFS : LES SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE AU	
SERVICE DE L'ÉCLAIRAGE AFS	43
2.1. INTRODUCTION.....	43
2.2. SYSTÈMES DE NAVIGATION	44
2.2.1. <i>Principes</i>	44
2.2.2. <i>Etat de l'art</i>	46
2.2.2.1. GEOROUTE® et GEOCONCEPT.....	46
2.2.2.2. ADASRP	46
2.2.2.3. MapInfo.....	47
2.2.2.4. ArcGIS	47
2.2.2.5. MapSensor.....	47
2.2.2.6. SIV SDK de la société BeNomad.....	48
2.2.3. <i>Le positionnement par GPS</i>	48
2.2.3.1. Historique	48
2.2.3.2. Description du système.....	49
2.2.3.3. Le système d'augmentation par satellite SBAS.....	50
2.2.4. <i>Les bases de données cartographiques</i>	50
2.2.4.1. Le format GDF.....	51

2.2.4.2.	Le format SDAL	52
2.2.5.	<i>Apports de la navigation pour les systèmes ADAS</i>	52
2.2.6.	<i>Limitations des systèmes de navigation</i>	54
2.2.6.1.	Limitations liées au positionnement par GPS	54
2.2.6.2.	Limitations liées à la cartographie	55
2.3.	L'ÉCLAIRAGE AFS : ÉTAT DE L'ART	56
2.3.1.	<i>Principes</i>	56
2.3.1.1.	Introduction	56
2.3.1.2.	Intérêts des systèmes AFS	56
2.3.2.	<i>Les projets AFS</i>	59
2.3.2.1.	Travaux récents en technologie AFS	59
2.3.2.2.	Prise en compte du conducteur pour l'amélioration des fonctions AFS	62
2.4.	LE PROJET NAFS	64
2.4.1.	<i>Concept et objectifs</i>	64
2.4.1.1.	Concept du projet NAFS	64
2.4.1.2.	Objectifs du projet NAFS	65
2.4.2.	<i>Structure de l'assistance NAFS</i>	66
2.4.3.	<i>Identification des situations de conduite et des stratégies d'éclairage</i>	67
2.4.3.1.	Situations et contextes de conduite considérés	67
2.4.3.2.	Identification des stratégies d'éclairage considérées	68
2.4.4.	<i>Identification des stratégies d'éclairage</i>	68
2.5.	LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT : ASPECT SÉCURITAIRE DE NAFS	69
2.6.	CONCLUSION	69
3.	CHAPITRE 3 : NÉCESSITÉ DE CAPTEURS VIRTUELS POUR L'AIDE À LA CONDUITE.....	71
3.1.	INTRODUCTION	71
3.2.	CAPTEURS VIRTUELS ET FUSION DE DONNÉES	71
3.2.1.	<i>Notion de capteur virtuel</i>	71
3.2.2.	<i>Capteurs virtuels pour l'assistance à la conduite</i>	72
3.2.3.	<i>Contexte de la fusion de données</i>	73
3.3.	PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA FUSION DE DONNÉES	73
3.3.1.	<i>Introduction</i>	73
3.3.2.	<i>Modèle fonctionnel et niveaux de fusion</i>	74
3.3.3.	<i>Architectures de fusion</i>	75
3.3.4.	<i>Etapas de fusion de données</i>	77
3.3.5.	<i>Contraintes liées aux applications</i>	78
3.3.5.1.	Contraintes sur l'imperfection des informations	78
3.3.5.2.	Contraintes d'une solution multi-sources	79
3.3.5.3.	Contraintes temps-réel	79
3.4.	FORMALISMES DE FUSION DE DONNÉES	80
3.4.1.	<i>Théorie des probabilités : inférence bayésienne</i>	80
3.4.1.1.	Modélisation	80
3.4.1.2.	Estimation	80
3.4.1.3.	Combinaison	81
3.4.1.4.	Décision	81
3.4.2.	<i>Les sous-ensembles flous et la théorie des possibilités</i>	82
3.4.2.1.	Notion de sous-ensembles flous	82
3.4.2.2.	La théorie des possibilités	83
3.4.2.3.	Fusion d'informations par la théorie des possibilités	84
3.4.3.	<i>Théorie des croyances</i>	86
3.4.3.1.	Modélisation :	86
3.4.3.2.	Estimation :	88
3.4.3.3.	Combinaison :	89
3.4.3.4.	Décision :	91
3.4.4.	<i>Conclusions sur ces méthodes</i>	92
3.5.	CONCLUSION	92
4.	CHAPITRE 1 : CAPTEURS VIRTUELS POUR NAFS.....	95
4.1.	INTRODUCTION	95
4.2.	CAPTEUR D'HORIZON GLISSANT ÉVÈNEMENTIEL	96
4.2.1.	<i>Concept</i>	96
4.2.2.	<i>Méthodologie</i>	96
4.2.3.	<i>Automate d'analyse événementielle</i>	97
4.3.	CAPTEUR DE DÉTERMINATION DES SITUATIONS DE CONDUITE	101
4.3.1.	<i>Introduction</i>	101
4.3.2.	<i>Fusion par la théorie des croyances</i>	102
4.3.3.	<i>Attributs extraits par le système de navigation</i>	103

4.3.4.	<i>Attributs extraits par la vision</i>	104
4.3.5.	<i>Fusion des attributs</i>	105
4.3.5.1.	Description de la méthode.....	105
4.3.5.2.	Modélisation et estimation des connaissances.....	106
4.3.5.3.	Combinaison des connaissances.....	109
4.4.	APPLICATIONS À L'ÉCLAIRAGE AFS.....	110
4.4.1.	<i>Introduction</i>	110
4.4.2.	<i>Eclairage AFS et capteur d'horizon glissant évènementiel</i>	110
4.4.3.	<i>Eclairage AFS et capteur de détermination des situations de conduite</i>	111
4.4.4.	<i>Commande d'éclairage par suivi de trajectoires</i>	112
4.4.4.1.	Nécessité d'un modèle à courbure continue.....	112
4.4.4.2.	Commande prédictive (« <i>Preview control</i> »).....	114
4.5.	CONCLUSION.....	115
5.	CHAPITRE 1 : MISE EN ŒUVRE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS	116
5.1.	INTRODUCTION.....	116
5.2.	MÉTHODOLOGIE : CYCLE EN V.....	116
5.3.	ENVIRONNEMENT DE SIMULATION.....	118
5.3.1.	<i>ADASRP</i>	118
5.3.1.1.	Architecture d'ADASRP.....	119
5.3.1.2.	Centrale de mesure <i>SensorBox</i>	120
5.3.2.	^{RT} <i>Maps</i> [®]	121
5.3.2.1.	Spécificités et intérêts.....	121
5.3.2.2.	Utilisation pratique.....	121
5.4.	LE VÉHICULE EXPÉRIMENTAL : « OPTIVEO ».....	122
5.4.1.	<i>Instrumentation</i>	123
5.4.2.	<i>Aspect logiciel</i>	124
5.5.	RÉSULTATS DES CAPTEURS VIRTUELS DÉVELOPPÉS.....	125
5.5.1.	<i>Résultats du capteur d'Horizon Glissant Evènementiel</i>	125
5.5.2.	<i>Performances du capteur de détermination des situations de conduite</i>	128
5.5.2.1.	Système de navigation et vision en accord.....	128
5.5.2.2.	Conflit entre le système de navigation et la vision.....	131
5.6.	APPLICATION DES CAPTEURS VIRTUELS À L'OPTIMISATION DES LOIS DE COMMANDE D'ÉCLAIRAGE AFS.....	134
5.6.1.	<i>Résultats de simulation</i>	134
5.6.1.1.	AFS assisté par le Capteur d'Horizon Glissant Evènementiel.....	134
5.6.1.2.	AFS assisté par le capteur de détermination des situations de conduite.....	142
5.6.2.	<i>Validation en conditions réelles</i>	143
5.6.2.1.	AFS assisté par le Capteur d'Horizon Glissant Evènementiel.....	143
5.6.2.2.	Paramétrage pour le DBL.....	147
5.7.	GÉNÉRALISATION DU CONCEPT : APPLICATION À LA DÉTECTION DES LIMITATIONS DE VITESSE.....	150
5.8.	CONCLUSION.....	156
	CONCLUSION GÉNÉRALE	157
	CONCLUSIONS.....	157
	PERSPECTIVES.....	158
	BIBLIOGRAPHIE	161
	PREMIÈRE PARTIE : CHAPITRES 1 ET 2.....	161
	DEUXIÈME PARTIE : CHAPITRES 3 ET 4.....	164
	TROISIÈME PARTIE : CHAPITRE 5.....	168
6.	ANNEXES	169
6.1.	ANALYSE FONCTIONNELLE DU SYSTÈME NAFS.....	169
6.1.1.	<i>Définitions des fonctions principales</i>	169
6.1.2.	<i>Définitions des fonctions de contraintes</i>	170
6.2.	ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES RISQUES.....	172
6.2.1.	<i>Découpage fonctionnel et arbres de défaillances des évènements redoutés</i>	174

Liste des figures

Figure 1-1: causes d'accidents dus aux défaillances humaines (Extraite de [11])	27
Figure 1-2 : Les domaines de sécurité routière (Extraite de [11]).....	28
Figure 1-3 : Système « conducteur-véhicule-environnement ».....	29
Figure 1-4 : Structure de coopération hiérarchique selon [51].....	30
Figure 1-5 : Structure de coopération hétérarchique selon [51]	30
Figure 1-6 : Fréquences de regard des rétroviseurs intérieur et extérieur lors de changement de voie d'après [78]	34
Figure 1-7 : trajectoires pour un conducteur « inexpérimenté » et un conducteur « très expérimenté » selon [51]	36
Figure 1-8 : Le conducteur vu comme un contrôleur en régulation de trajectoire	37
Figure 1-9 : Modèle du conducteur de Afonso et al. [2].....	37
Figure 1-10 : Modèle cognitif d'après Rasmussen [65].....	39
Figure 2-1 : Système d'éclairage actuel.....	44
Figure 2-2 : Architecture d'un système de navigation.....	46
Figure 2-3 : Structure de MapSensor (Extraite de [39])	48
Figure 2-4 : Constellation des 24 satellites du système GPS	50
Figure 2-5 : Modélisation du tracé routier (Extraite de [16]).....	51
Figure 2-6: Formes du faisceau lumineux de l'éclairage AFS selon les situations de conduite (Extrait de [27])	56
Figure 2-7 : Distance de détection des objets pour les différentes fonctions d'éclairage en courbe d'après [27]	57
Figure 2-8 : Distance de détection des objets pour les fonctions d'éclairage en autoroute et intersection d'après [27] (<i>Halogen</i> =éclairage conventionnel, <i>Adaptive lighting</i> =éclairage prédictif)	58
Figure 2-9 : Evaluation subjective de l'éclairage AFS d'après [27].....	59
Figure 2-10 : Calcul de l'angle de pivotement selon Ackermann (Extraite de [77]).....	60
Figure 2-11 : Stratégies de pivotement selon Yamamoto [83].....	61
Figure 2-12 : Taux d'amélioration de l'illumination du point de fixation en fonction des rayons de courbure d'après [83] (volant à gauche).....	61
Figure 2-13 : Valeurs d'éblouissement des véhicules venant en sens inverse d'après [83].....	62
Figure 2-14 : Distribution du regard en courbe d'après [44] (conduite à gauche)	63
Figure 2-15 : Distance du regard en conduite diurne en virage d'après [44]	63
Figure 2-16 : Angle de pivotement correspondant à V et R d'après [44].....	64
Figure 2-17 : Objectifs du projet NAFS.....	66
Figure 2-18 : Structure de l'assistance NAFS	67
Figure 2-19 : Situations de conduite, contextes et stratégies d'éclairage associées	68

Figure 3-1 : Structure d'un capteur virtuel (Extrait de [152]).....	72
Figure 3-2 : Modèle de fusion de données du <i>Joint Directors of Laboratories</i> selon [118].....	75
Figure 3-3 : Architecture de fusion centralisée selon [118].....	76
Figure 3-4 : Architecture de fusion décentralisée selon [118]	76
Figure 3-5 : Architecture de fusion hybride selon [118].....	77
Figure 3-6 : Représentation de la fusion selon [128].....	78
Figure 3-7 : Sous-ensembles classiques et sous-ensembles flous.....	83
Figure 4-1 : Principe du capteur virtuel d'Horizon Glissant Évènementiel.....	97
Figure 4-2 : Chemins empruntables selon la localisation du véhicule (Extrait de [59]).....	97
Figure 4-3 : Analyse évènementielle de l'horizon électronique.....	98
Figure 4-4 : Automate d'analyse évènementielle	100
Figure 4-5: génération des situations et des contextes de conduite	101
Figure 4-6 : Structure du système multi-capteurs de détection des situations de conduite	102
Figure 4-7 : Attributs du système de navigation.....	104
Figure 4-8 : Discrimination des situations de conduite par la théorie des croyances.....	105
Figure 4-9 : Optimisation de la commande d'éclairage AFS utilisant le capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel	111
Figure 4-10 : Optimisation de la commande d'éclairage AFS utilisant le capteur de détermination des situations de conduite	111
Figure 4-11 : Caractéristiques des courbes polaires	113
Figure 4-12 : Modèle trajectographique.....	114
Figure 4-13 : Commande en boucle ouverte de l'éclairage en courbe.....	115
Figure 5-1 : Phases du cycle en V incluant la sûreté de fonctionnement.....	117
Figure 5-2 : Environnement de simulation pour le capteur virtuel HGE	118
Figure 5-3 : Environnement de simulation pour le capteur virtuel de détermination de situations de conduite	118
Figure 5-4 : Interface graphique (ADASMonitor) d'ADASRP V3.8.....	119
Figure 5-5 : Architecture d'ADASRP.....	120
Figure 5-6 : Centrale de mesure <i>SensorBox</i> d'ADASRP (Extrait de [59]).....	120
Figure 5-7 : L'environnement ^{RT} Maps [®]	122
Figure 5-8 : Véhicule de démonstration « OptiVeo ».....	122
Figure 5-9 : Instrumentation du véhicule de démonstration « OptiVeo ».....	123
Figure 5-10 : Coffre du véhicule de démonstration « OptiVeo ».....	124
Figure 5-11 : Projecteur AFS droit (Optique Bi – Xénon + Lampe FBL).....	124
Figure 5-12 : Architecture matérielle/logicielle d'acquisition et de commande	125
Figure 5-13 : Itinéraire de simulation sur Autoroute	126

Figure 5-14 : Résultats de simulation du capteur d’horizon électronique ponctuel	127
Figure 5-15 : Résultats de simulation du capteur d’horizon glissant évènementiel	127
Figure 5-16 : Croyances du système de navigation	129
Figure 5-17 : Croyances du système de vision	130
Figure 5-18 : Fusion pour la limitation de vitesse 50	131
Figure 5-19 : Croyances du système de navigation	132
Figure 5-20 : Croyances du système de vision	133
Figure 5-21 : Fusion pour la limitation de vitesse 110	133
Figure 5-22 : Activation du TL en entrée de ville	135
Figure 5-23 : Désactivation du TL en sortie de ville	135
Figure 5-24 : Activation du TL en ville pour l’itinéraire de la Figure 5-23.....	136
Figure 5-25 : Activation du TL dans le rond-point.....	136
Figure 5-26 : Désactivation du TL en sortie de rond-point.....	137
Figure 5-27 : Activation du TL pour le rond-point de la Figure 5-25	137
Figure 5-28 : Activation du ML en entrée d’autoroute.....	138
Figure 5-29 : Désactivation du ML en sortie d’autoroute.....	138
Figure 5-30 : Activation du ML en autoroute de l’itinéraire des figures Figure 5-28 et Figure 5-29 ..	139
Figure 5-31 : Activation du TL en entrée de ville après sortie d’autoroute (Figure 5-29)	139
Figure 5-32 : Activation du FBL+DBL en entrée de virage	140
Figure 5-33 : Désactivation du FBL+DBL en sortie de virage	140
Figure 5-34 : Tracé en X et Y des deux virages	141
Figure 5-35 : Activation du FBL+DBL dans les deux virages de la Figure 5-34	141
Figure 5-36 : Rayons de courbure dans les deux virages de la Figure 5-34.....	141
Figure 5-37 : Diagramme RTMaps [®] des simulations HIL pour l’optimisation de l’éclairage AFS (en rejeu).....	142
Figure 5-38 : Résultats de simulation HIL du capteur de détermination de situations de conduite – Conduite en autoroute.....	143
Figure 5-39 : Un virage de test réel	144
Figure 5-40 : Rotation du DBL gauche basé sur le capteur virtuel d’horizon glissant évènementiel (pour un virage).....	145
Figure 5-41 : Rotation du DBL droit basé sur le capteur virtuel d’horizon glissant évènementiel (pour un virage).....	145
Figure 5-42 : Deux virages de test réel	146
Figure 5-43 : Rotation du DBL gauche basé sur le capteur virtuel d’horizon glissant évènementiel (pour deux virages).....	146

Figure 5-44 : Rotation du DBL droit basé sur le capteur virtuel d'horizon glissant événementiel (pour deux virages).....	147
Figure 5-45 : Résultat de rotation en mode dégradé du DBL gauche.....	147
Figure 5-46 : Résultat de rotation en mode dégradé du DBL droit	148
Figure 5-47 : Angle de pivotement correspondant à V et R.....	148
Figure 5-48 : Vitesse du véhicule pour les deux virages de la Figure 5-42	149
Figure 5-49 : Rotation du DBL gauche avec utilisation de la vitesse.....	149
Figure 5-50 : Rotation du DBL droit avec utilisation de la vitesse	150
Figure 5-51 : Diagramme ^{RT} Maps [®] des essais réels pour le système SLS.....	151
Figure 5-52 : Communication entre ADASRP et RTMaps pour le système SLS	152
Figure 5-53 : Résultats du système SLS en sortie d'autoroute.....	153
Figure 5-54 : Résultats du système SLS une fausse détection de la navigation.....	154
Figure 5-55 : Résultats du système SLS avec la vision et la navigation en accord total	155
Figure 5-56 : Résultats avec la vision et la navigation en accord partiel.....	156
Figure 6-1 : Diagramme d'environnement des fonctions principales du système NAFS.....	170
Figure 6-2: Diagramme d'environnement des fonctions de contrainte du système NAFS.....	172
Figure 6-3 : Branche de l'arbre de défaillance de l'évènement redouté éblouissement	175

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Catégories de conducteurs selon Rothengatter [69]	35
Tableau 2-1 : Attributs à ajouter aux bases de données cartographiques pour les applications ADAS .	53
Tableau 2-2 : <i>Roadmap</i> des applications ADAS basées sur la navigation.....	54
Tableau 2-3 : fréquences des angles de pivotement sur différentes routes d'après [77]	60
Tableau 2-4 : Stratégies d'éclairage.....	69
Tableau 3-1 : Confrontation des formalismes de fusion de données	92
Tableau 4-1 : Situations, transitions et contextes de conduite identifiés	99
Tableau 4-2 : Eléments focaux de la navigation en fonction de la limitation de vitesse	106
Tableau 4-3 : Masses de croyances de la navigation	108
Tableau 4-4 : Symboles relatifs aux polynômes polaires.....	112
Tableau 6-1 : Résumé des fonctions principales	170
Tableau 6-2 : Analyse préliminaire des risques.....	173
Tableau 6-3 : Grille de cotation de sécurité.....	173
Tableau 6-4 : Grille de cotation de disponibilité	174

Résumé

La conduite nocturne avec un système d'éclairage conventionnel n'est pas suffisamment sécurisante. En effet, si l'on roule beaucoup moins de nuit, plus de la moitié des accidents de la route arrivent pendant cette période. Dans le but de réduire ces accidents du trafic nocturne, le projet européen « Adaptive Front lighting System » (AFS) a été initié. L'objectif pour les constructeurs et équipementiers automobiles est d'aboutir en 2008 à un changement de réglementation de l'éclairage automobile. Pour cela, ils explorent les différents modes de réalisation possible de nouvelles fonctions d'éclairage basées sur la déformation du faisceau lumineux, et étudient la pertinence, l'efficacité par rapport à la situation de conduite, mais aussi les dangers associés à l'utilisation, pour ces fonctions, d'éclairage, d'informations issues du véhicule ou de l'environnement.

Depuis 2003, des véhicules proposent d'orienter l'éclairage en virage, cette solution, ne tenant compte que des actions du conducteur sur le volant, permet d'améliorer la visibilité en orientant le faisceau vers l'intérieur du virage. Cependant, le profil de route (intersections, courbure, etc.) n'étant pas toujours connu du conducteur, les performances liées à cette solution sont dès lors limitées. Or les systèmes embarqués de navigation, d'une part peuvent apporter des informations primordiales sur cette forme, et d'autre part disposent d'informations contextuelles (ouvrages d'art, nature de la route, rayon de virage, limitations de vitesse en vigueur...).

Le sujet de cette thèse a pour objectif d'optimiser les lois de commande des systèmes d'éclairage en s'appuyant sur la fusion des informations issues des systèmes de navigation avec celles des capteurs embarqués dans le véhicule (caméras, ...), tout en sachant jusqu'à quel point les systèmes actuels et futurs peuvent répondre à ces attentes de manière efficace et fiable. Ainsi, cette fusion des informations, appliquée ici à la prise de décision, permet de définir les situations et les contextes de conduite de l'environnement d'évolution du véhicule (autoroute, ville, etc.) et de choisir la loi appropriée parmi les différentes lois de commande d'éclairage développées pour répondre aux fonctionnalités recherchées (code autoroute, code ville, code virage). Cette démarche permet de choisir en temps réel, et par anticipation, entre ces différentes lois de commande. Elle permet, par conséquent, l'amélioration de la robustesse du système d'éclairage.

Deux points sont à l'origine de cette amélioration. Premièrement, à partir du système de navigation, nous avons développé un capteur virtuel d'horizon glissant événementiel permettant la détermination précise des différentes situations de conduite en utilisant un automate d'états finis. Il permet ainsi de pallier aux problèmes de la nature ponctuelle des informations du système de navigation. Deuxièmement, nous avons développé un capteur virtuel générique de détermination des situations de conduite basé sur la théorie des croyances en utilisant un système de navigation et la vision. Ce capteur combine les confiances en provenance des deux sources pour mieux distinguer entre les différentes situations et les différents contextes de conduite et de pallier aux problèmes des deux sources prises indépendamment. Il permet également de construire une confiance du système de navigation à partir de quelques critères de celui-ci. Ce capteur générique est généralisable à d'autres systèmes d'aide à la conduite (ADAS) autre que l'éclairage. Ceci a été montré en l'appliquant à un système de détection des limitations de vitesses réglementaires SLS (Speed Limit Support).

Les deux capteurs virtuels développés ont été appliqués à l'optimisation de l'éclairage AFS et au système SLS. Ces deux systèmes ont été implémentés sur un véhicule de démonstration et ils sont actuellement opérationnels. Ils ont été évalués par différents types de conducteur allant des non experts aux experts de l'éclairage et des systèmes d'aide à la conduite (ADAS). Ils ont été également montrés auprès des constructeurs automobiles (PSA, Audi, Renault, Honda, etc.) et au cours de différents « techdays » et ils ont prouvé leur fiabilité lors des démonstrations sur routes ouvertes avec des différentes situations et différents contextes de conduite.

Mots clés

Fusion multi-capteurs, Théorie des croyances, Capteurs virtuels, Aide à la conduite, Eclairage automobile adaptatif, Système d'Information Géographique, Vision,

Abstract

Night-time driving with conventional headlamps is particularly unsafe. Indeed, if one drive much less at night, more than half of the driving fatalities occur during this period. To reduce these figures, several automotive manufacturers and suppliers participated to the European project “Adaptive Front lighting System” (AFS). This project has the aim to define new lightings functions based on an beam adaptation to the driving situation. And, it has to end in 2008 with a change of regulation of the automotive lighting allowing so realisation of all new AFS functions. For that, they explore the possible realisation of such new lighting functions, and study the relevance, the efficiency according to the driving situation, but also the dangers associated with the use, for these lighting functions, of information from the vehicle or from the environment.

Since 2003, some vehicles are equipped by bending lights, taking account only of actions of the driver on the steering wheel. These solutions make it possible to improve the visibility by directing the beam towards the interior of the bend. However, the road profile (intersections, bends, etc) not being always known for the driver, the performances related to these solutions are consequently limited. However the embedded navigation systems, on the one hand can contain information on this road profile, and on the other hand have contextual information (engineering works, road type, curve radius, speed limits ...).

The topic of this thesis aims to optimize lighting control laws based on fusion of navigation systems information with those of vehicle embedded sensors (cameras,...), with consideration of their efficiency and reliability. Thus, this information fusion, applied here to the decision-making, makes it possible to define driving situations and contexts of the vehicle evolution environment (motorway, city, etc) and to choose the appropriate law among the various of developed lighting control laws (code motorway lighting, town lighting, bending light). This approach makes it possible to choose in real time, and by anticipation, between these various lighting control laws. It allows, consequently, the improvement of the robustness of the lighting system.

Two points are at the origin of this improvement. Firstly, using the navigation system information, we developed a virtual sensor of event-based electronic horizon analysis allowing an accurate determination of various driving situations. It uses a finite state machine. It thus makes it possible to mitigate the problems of the punctual nature of the navigation system information. Secondly, we developed a generic virtual sensor of driving situations determination based on the evidence theory of using a navigation system and the vision. This sensor combines confidences coming from the two sources for better distinguishing between the various driving situations and contexts and to mitigate the problems of the two sources taken independently. It also allows to build a confidence of the navigation system using some of their criteria. This generic sensor is generalizable with other assistance systems (ADAS) that lighting one. This was shown by applying it to a speed limit detection system SLS (Speed Limit Support).

The two developed virtual sensors were applied to the optimization of lighting system (AFS) and for the SLS system. These two systems were implemented on a experimental vehicle (demonstration vehicle) and they are currently operational. They were evaluated by various types of driver going from non experts to experts. They were also shown to car manufacturers (PSA, Audi, Renault, Honda, etc.) and during different techdays. They proved their reliability during these demonstrations on open roads with various driving situations and contexts.

Key words

Advanced Driver Assistance System (ADAS), Advanced Front lighting System (AFS), Multisensor fusion, Evidence theory, Virtual sensors, Navigation system, Vision, Driver modelling and classification, Functional safety.

Références personnelles

Brevets déposés

- Titre : Procédé de commande comportant une étape d'augmentation de la fréquence de clignotement d'un feu indicateur de direction
Type : Brevet déposé à l'INPI sous la référence 06/08437
Auteurs: B. Bradai, A. Herbin, B. Reiss, J. Ph. Lauffenburger, M. Basset
Date : 26 Septembre 2006
- Titre : Procédé de détermination anticipée d'un virage sur une portion de route et système associé
Type : Brevet déposé à l'INPI sous la référence 06/08439
Auteurs: B. Bradai, A. Herbin, J. Ph. Lauffenburger, M. Basset
Date : 26 Septembre 2006

Brevets en cours de dépôt

- Titre : Système de sélection automatique du champ de vision et du logiciel associé d'un système basé sur la vision
Type : Brevet
Auteurs: A. Herbin, B. Bradai,
Date : en cours
- Titre : Système multi capteurs de détection anticipative des limitations de vitesses et des situations de conduite sur route
Type : Brevet
Auteurs: B. Bradai, A. Herbin, J. Ph. Lauffenburger, M. Basset
Date : en cours

Communications internationales

- Titre : Predictive Navigation-based Virtual Sensor for Enhanced Lighting
Type : communication
Auteurs : B. Bradai, A. Herbin, J. Ph. Lauffenburger, M. Basset
Date : 25-26 Septembre 2007
Détails : International Symposium of Automotive Lighting ISAL2007, Darmstadt, Germany.
- Titre : Navigation as a Virtual Sensor for Enhanced Lighting Preview Control
Type : communication
Auteurs : J. Ph. Lauffenburger, B. Bradai, A. Herbin, M. Basset
Date : 13-15 Juin 2007
Détails : IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV2007, Istanbul, Turkey.

- Titre : Navigation support for enhanced lighting
Type : communication
Auteurs : B. Bradai, A. Herbin, J. Ph. Lauffenburger, M. Basset
Date : 04 Octobre 2006
Détails : International Congress « Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving » V.I.S.I.O.N 2006, Société des Ingénieurs de l'Automobile SIA, Rouen, France.
- Titre : Commande prédictive d'éclairage automobile assisté par un système de navigation
Type : communication invitée
Auteurs : B. Bradai, J. Ph. Lauffenburger, M. Basset, A. Herbin, J. Lelevé
Date : 30 Mai – 01 Juin 2006
Détails : Conférence Internationale Francophone d'Automatique IEEE CIFA 2006, Bordeaux, France.

Communication nationale

- Titre : Commande d'éclairage automobile assistée par un système de navigation
Type : Séminaire
Auteurs : B. Bradai, J. Ph. Lauffenburger, M. Basset, G. L. Gissinger, A. Herbin, J. Lelevé
Date : 12 Mai 2005
Détails : Séminaire CRESPIIM, Mulhouse, France.

Introduction générale

Sécurité routière

En 2002 et en 2003, on a dénombré par an dans le monde 1,2 millions de morts sur la route et 50 millions de blessés, et cela a coûté 407 milliards d'euros. Quant à l'union européenne (EU-15), chaque année, plus de 40000 personnes meurent en raison des accidents de la route et 1.7 million sont blessés. Ces accidents sont la cause principale de la mort dans la catégorie d'âge de moins de 45 ans et causent plus de décès que la maladie de coeur ou le cancer dans ce groupe d'âge. Le coût pour la société a été estimé à 160 milliards d'euro par an, qui correspond à 2% du rendement économique de l'union européenne.

Jusqu'à présent, les autorités publiques et l'industrie automobile ont été impliquées dans l'amélioration des conditions de sécurité routière par la prévention des accidents et par la réduction du nombre de blessés sur la route. La plupart des mesures préventives se sont focalisées sur le conducteur. Toutefois, ces mesures conventionnelles atteignent des limites et ce sont de nouvelles technologies associées qui permettront encore de réduire le nombre d'accidents à l'avenir. Ceci sera possible grâce à la combinaison de mesures sécuritaires passives et actives avec des technologies de l'information et de la navigation. Cette approche intégrée s'appuie sur une méthodologie qui tient compte des interactions entre le conducteur, le véhicule et l'infrastructure routière. Cette méthodologie peut contribuer de manière significative à la réduction du nombre d'accidents de la route.

Causes des accidents

Loin d'être infaillible, le conducteur est très souvent responsable des accidents, et cela à hauteur de 90%.

Les accidents ont de multiples causes souvent conjointes. On distingue habituellement, d'une part, des causes primaires liées au véhicule, à l'infrastructure, à la signalisation et à des activités de conduite durant les instants qui ont précédé l'accident. D'autre part, les causes secondaires qui relèvent d'activités humaines antérieures et de comportements plus généraux. Les principaux facteurs incriminés étant la consommation d'alcool, la pratique de vitesses excessives et des prises de risques inconsidérées.

Conduite nocturne, visibilité et accidents

Plus de 90% des décisions et des gestes nécessaires à la conduite d'une voiture dépendent des informations visuelles du conducteur. Une bonne acuité visuelle est donc primordiale pour conduire de jour et surtout de nuit. Il ne s'agit pas seulement de voir, mais de bien voir ; de pouvoir apercevoir à temps la silhouette sombre d'un piéton qui, hors de portée des phares, se détache à peine sur le bord de la route. En 2005 en France, 20 piétons sont morts sur autoroute, et dans 75 % des cas la nuit, ce qui montre l'importance de la visibilité.

La nuit, même une personne dotée d'une excellente vue perd 5 à 6/10ème. Sans la lumière du soleil, les couleurs sont modifiées, les contrastes inversés, les distances et le relief faussés. Sur une route non éclairée, la vision se limite au faisceau des phares, soit une cinquantaine de mètres seulement avec les feux de croisement.

La conduite nocturne avec un système d'éclairage conventionnel n'est pas suffisamment sécurisante. Il se produit en effet trois fois plus d'accidents mortels la nuit que le jour, alors que le trafic de nuit ne représente qu'un quart du trafic total. La vitesse excessive liée à une vision altérée explique ces

différences. A cela bien des raisons : celles liées à la perte d'acuité visuelle, plus l'éblouissement, la fatigue, et parfois l'alcool ou la vitesse. Mais la principale raison de ces accidents est la mauvaise visibilité, de plus 80% des personnes accidentées de nuit sont habillées de vêtements sombres. Dans le crépuscule, lorsque les couleurs ne sont plus discernables, un conducteur, même possédant une acuité visuelle excellente, ressent une légère myopie. Cette myopie nocturne dégrade sensiblement la qualité des images perçues par le conducteur et le place ainsi dans une situation délicate où prudence et attention sont de mise. Malgré les systèmes actuels performants d'éclairage des phares, un problème n'a pas été résolu : les feux de croisement éclairent sur une distance d'environ 60 mètres afin que la circulation en sens inverse ne soit pas éblouie.

L'éclairage automobile

Eclairage conventionnel :

De nuit, les feux servent à voir, mais aussi à être vu, et ce sans éblouir les autres. Leur usage est codifié par le législateur et tout manquement peut être sanctionné. **Les feux de position** (veilleuses) sont autorisés en agglomération, même par temps de pluie lorsque la visibilité est suffisante. Ils signalent aussi un véhicule à l'arrêt sur le bord d'une route, en complément des feux de détresse (warning). **Les feux de croisement** (codes) sont de mise dès la tombée de la nuit et, plus généralement, quand la visibilité est inférieure à 150 mètres (pluie, brouillard...). Moins puissants mais moins éblouissants que les feux de route, il faut s'en contenter lorsqu'on suit ou croise un véhicule. **Les feux de route** peuvent s'allumer quand on est seul sur la route. Les feux de brouillard avant et arrière sont interdits la nuit en l'absence de brouillard, de chute de neige ou de très fortes pluies.

Eclairage directionnel :

Dans le but de réduire les accidents du trafic nocturne, le projet européen « Adaptive Front lighting System » (AFS) a été initié. L'objectif pour les constructeurs et équipementiers automobiles est d'aboutir en 2008 à un changement de réglementation de l'éclairage automobile. Pour cela, ils explorent les différents modes de réalisation possible de nouvelles fonctions d'éclairage basées sur la déformation du faisceau lumineux, et étudient la pertinence, l'efficacité par rapport à la situation de conduite, mais aussi les dangers associés à l'utilisation, pour ces fonctions, d'éclairage, d'informations issues du véhicule ou de l'environnement.

Des systèmes actifs d'éclairage ont fait leur apparition récemment sur des véhicules de moyenne et haute gamme.

Des systèmes de ce type, visant à améliorer la visibilité, la sécurité et le confort du conducteur dans des situations de conduite précises (virages et intersections), équipent déjà quelques véhicules. Ainsi, on trouve d'une part, les phares orientables dynamiques (Citroën C5, BMW...) et d'autre part, les phares statiques additionnels pour l'éclairage latéral (Renault Modus). Ces phares tiennent principalement compte de l'angle au volant et permettent donc d'associer l'orientation de l'éclairage à la direction que prend le véhicule et d'ajuster l'orientation des faisceaux lumineux en suivant les actions du conducteur au volant. Cette première génération d'éclairage actif ne permet néanmoins pas d'anticiper et/ou annoncer un changement du profil routier.

Nouvelles technologies pour l'éclairage et pour ADAS

Le profil de route (intersections, courbure, etc.) n'étant pas toujours connu du conducteur, les performances liées à ces solutions d'éclairage antérieures sont dès lors limitées. Or les systèmes embarqués de navigation, d'une part peuvent apporter des informations primordiales sur cette forme, et

d'autre part disposent d'informations contextuelles (ouvrages d'art, nature de la route, rayon de virage, limitations de vitesse en vigueur...). En effet, ils peuvent apporter de bons résultats en terme d'anticipation.

L'utilisation des systèmes de navigation permet d'améliorer l'éclairage en l'adaptant à la géométrie de la route en anticipation. Elle permet aussi d'améliorer les systèmes d'aide à la conduite ADAS (« Advanced Driver Assistance Systems »). Le système de navigation peut être vu comme un nouveau capteur virtuel de la géométrie de la route à l'avant du véhicule et permet ainsi à ces systèmes de réagir de façon anticipative à d'éventuels dangers liés à la perception de l'environnement. Les systèmes de navigation intègrent souvent des informations du trafic envoyées par des centres de trafic en utilisant le RDS-TMC (Radio Data Signal - Traffic Messaging Channel). Ceci permet d'avoir une perception anticipative et dynamique de l'environnement d'évolution du véhicule. L'utilisation des technologies de communication infrastructure – véhicule ou véhicule – véhicule permet d'avoir des informations supplémentaires sur cette perception dynamique de l'environnement.

Capteurs virtuels et fusion de données pour ADAS :

Un grand nombre de dispositifs de sécurité active ont été récemment mis en oeuvre et intègrent progressivement nos véhicules. On rappellera, pour exemple, l'ABS, le TCS (antipatinage au démarrage), le régulateur de vitesse ou encore le système de navigation par GPS. Pour l'heure, ces dispositifs sont indépendants alors qu'ils sont d'une complémentarité évidente. Une idée majeure consiste alors à exploiter au maximum les avantages et caractéristiques de différents organes de sécurité ou d'assistance existants sur les véhicules en les intégrant dans une même architecture. Ceci se fait en fusionnant les informations provenant de ces différents organes dans un schéma de fusion de données afin de concevoir des capteurs virtuels permettant la perception de l'environnement d'évolution du véhicule. La détermination précise des situations et contextes de conduite peut être réalisée à l'aide des capteurs virtuels. Ces capteurs virtuels améliorent les systèmes d'aide à la conduite en leur délivrant des informations non mesurables par des capteurs conventionnels et en leur donnant des informations anticipatives grâce à l'utilisation de la navigation. La fusion des informations de plusieurs capteurs, permettant la réalisation de ces capteurs virtuels, d'une part donne des informations plus précises que celles fournies par un seul capteur pris indépendamment. D'autre part, elle garantit la disponibilité des informations en cas de défaillance d'un de ces capteurs.

Problématique de la thèse

Le sujet de cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet NAFS (« Navigation-based Advanced Front lighting System ») initié dans le cadre de la collaboration entre Valeo Driving Assistance et le laboratoire MIPS/MIAM. Il représente la suite et la généralisation du projet NAICC (« Navigation Aided Intelligent Cruise Control) développé par le laboratoire MIPS/MIAM. Le projet NAFS est proposé d'améliorer la sécurité et le confort du conducteur en lui assurant un éclairage adaptatif en fonction de la géométrie de la route mais aussi prédictif et anticipatif afin de lui donner le temps de réagir face à d'éventuels dangers et d'obstacles. L'idée est de concevoir des capteurs virtuels de détermination des situations et contextes de conduite pour le choix entre différentes lois d'éclairage selon la géométrie de la route. Ce capteur peut être généralisé et utilisé pour d'autres systèmes d'aide à la conduite ADAS (« Advanced Driver Assistance Systems »).

Ce sujet de cette thèse a pour objectif d'optimiser les lois de commande des systèmes d'éclairage en s'appuyant sur la fusion des informations issues des systèmes de navigation avec celles des capteurs embarqués dans le véhicule (caméras, ...), tout en sachant jusqu'à quel point les systèmes actuels et futurs peuvent répondre à ces attentes de manière efficace et fiable. Ainsi, cette fusion des informations, appliquée ici à la prise de décision, permet de réaliser des capteurs virtuels génériques. Ces capteurs permettent de définir les situations et les contextes de conduite de l'environnement d'évolution du véhicule (autoroute, ville, etc.) et de choisir ainsi la loi appropriée parmi les différentes

lois de commande d'éclairage développées pour répondre aux fonctionnalités recherchées (code autoroute, code ville, code virage). Cette démarche permet de choisir en temps réel, et par anticipation, entre ces différentes lois de commande. Elle permet, par conséquent, l'amélioration de la robustesse du système d'éclairage. Ces capteurs virtuels ont aussi pour objectif d'être généralisable à d'autres systèmes d'aide à la conduite nécessitant la connaissance précise des situations et contextes de conduite. L'idée était leur utilisation pour le système de détermination des limitations de vitesses réglementaires en plus de l'éclairage AFS.

Organisation du document

Le manuscrit est composé de trois parties englobant cinq chapitres :

Première partie (chapitres 1 et 2) : contexte

Le développement des systèmes d'aide à la conduite a pour principal objectif l'amélioration de la sécurité routière en réduisant le nombre d'accidents. Le confort du conducteur est aussi un objectif de ces systèmes. Le développement de ces systèmes d'aide à la conduite ne peut pas se faire sans considération du système complet « Conducteur-Véhicule-Environnement ». En effet, des recherches dans le domaine de la sécurité routière ont montré la nécessité de prendre en compte l'analyse et la modélisation du conducteur. Plus particulièrement, les travaux consistent à étudier la modélisation du conducteur afin de l'intégrer dans la boucle de commande ou à le classifier afin d'individualiser le système d'aide à la conduite en fonction du type de conducteur : novice, expérimenté, etc.

Cette partie présente la sécurité routière ainsi que le conducteur dans le cadre du système « Conducteur-Véhicule-Environnement ». Elle présente également l'apport des systèmes d'aide à la conduite et leurs impacts potentiels sur le conducteur. Le projet NAFS est ensuite présenté avec un état de l'art des systèmes de navigation et de l'éclairage AFS ainsi que leur application pour l'optimisation de ce dernier. La sûreté de fonctionnement a été considérée dans ce projet NAFS pour éviter l'impact d'éventuels événements redoutés sur le conducteur et les autres usagers de la route.

Deuxième partie (chapitres 3 et 4) : capteurs virtuels pour le projet NAFS

Après avoir décrit le projet NAFS, dans la deuxième partie est détaillé l'aspect capteur virtuel au service des systèmes d'aide à la conduite. Le développement de ce genre de capteurs passe par l'utilisation de la fusion de données de différents capteurs. Cette dernière est présentée dans cette partie en faisant le tour des méthodes existantes. Deux capteurs virtuels génériques et originaux ont été développés sur la base du système de navigation et d'un système de vision par caméra. Un premier capteur appelé « capteur d'horizon glissant événementiel » fondé sur le système de navigation pris tout seul a été développé. Ce capteur a pour objectif de pallier au problème de la nature ponctuelle des données des systèmes de navigation. Ce capteur, réalisé à l'aide d'un automate d'états finis, est ensuite utilisé dans un schéma de fusion de données pour le développement d'un deuxième capteur de détermination des situations de conduite. Ce schéma de fusion est basé sur une stratégie combinant un système de navigation avec un système de vision à base de caméra. La théorie des croyances a été utilisée pour cette fusion. L'estimation des masses de croyances du système de navigation a été réalisée à l'aide d'une méthode originale utilisant plusieurs critères de la navigation afin de construire sa confiance. Ce capteur combine ensuite les confiances en provenance des deux sources (navigation et vision) pour mieux distinguer entre les différentes situations et les différents contextes de conduite et de pallier aux problèmes des deux sources prises indépendamment. L'optimisation de l'éclairage AFS en utilisant ces deux capteurs est ensuite discutée dans cette partie.

Troisième partie (chapitre 5) : mise en œuvre expérimentale et résultats

La troisième partie du mémoire décrit, d'une part les méthodes mises en œuvre pour valider les concepts développés dans la deuxième partie, et d'autre part les résultats expérimentaux obtenus. Ceci a permis d'évaluer les performances des deux capteurs virtuels développés en simulations et en essais dans des conditions réelles en utilisant un véhicule expérimental équipé.

Les deux capteurs virtuels développés ont été appliqués à l'optimisation de l'éclairage AFS.

Le capteur virtuel et générique de détermination des situations de conduite a été montré généralisable à d'autres systèmes d'aide à la conduite (ADAS) autre que l'éclairage. Ceci a été montré en l'appliquant à un système de détection des limitations de vitesses réglementaires SLS (Speed Limit Support).

Ces deux capteurs ont été évalués par différents types de conducteur allant des non experts aux experts de l'éclairage et des systèmes d'aide à la conduite (ADAS). Ils ont été également montrés auprès des constructeurs automobiles (PSA, Audi, Renault, Honda, etc.) et au cours de différents « techdays ». Ils ont prouvé leur fiabilité lors des démonstrations sur routes ouvertes avec différentes situations et différents contextes de conduite.

1. Chapitre 1 : Assistance à la conduite : Notions de sécurité et de confort routiers

1.1. Introduction

Le trafic routier est devenu de plus en plus dense et dangereux pendant ces dernières années et présente un grand risque. La réduction des accidents de la route est un des objectifs de la politique des transports de l'ensemble des pays européens. Les mesures traditionnelles de prévention se sont focalisées sur le comportement du conducteur et sur l'amélioration de la sécurité passive dans les véhicules. Toutefois, ces mesures conventionnelles atteignent des limites et ce sont de nouvelles technologies associées qui permettront encore de réduire le nombre d'accidents à l'avenir. Ceci sera possible grâce à la combinaison de mesures sécuritaires passives et actives avec des technologies de l'information et de la navigation. Cette approche intégrée s'appuie sur une méthodologie qui tient compte des interactions entre le conducteur, le véhicule et l'infrastructure routière [5], [19]. Dans le but de réduire ce nombre d'accidents et d'améliorer la sécurité et le confort du conducteur et de ses passagers, plusieurs systèmes d'assistance à la conduite ont été développés et beaucoup d'autres sont à l'étude et en cours de développement. L'éclairage intelligent est l'une de ces assistances visant à améliorer la sécurité et le confort et devrait permettre de réduire le grand nombre d'accidents arrivant pendant la conduite nocturne qui représente la moitié des accidents de la route (bien que l'on roule moins la nuit).

Ce chapitre a pour objectif la présentation du contexte de cette thèse. Il pose le problème de la sécurité routière puis l'apport des systèmes d'assistance à la conduite ayant pour principal objectif l'amélioration de cette sécurité routière et la réduction du nombre d'accidents. Le développement de ces systèmes d'aide à la conduite ne peut pas se faire sans considération du système complet « Conducteur-Véhicule-Environnement ». En effet, des recherches dans le domaine de la sécurité routière ont montré la nécessité de prendre en compte l'analyse et la modélisation du conducteur. Plus particulièrement, les travaux dans ce chapitre consistent à étudier la modélisation du conducteur afin de l'intégrer dans la boucle de commande ou à le classifier afin d'individualiser le système d'aide à la conduite en fonction du type de conducteur : novice, expérimenté, etc.

1.2. Sécurité routière

Chaque année, plus de 40000 personnes meurent dans l'union européenne (EU-15) en raison des accidents de la route et 1.7 million sont blessées. Ces accidents constituent la cause principale de décès dans la catégorie des moins de 45 ans et causent davantage de décès que les maladies cardiaques ou le cancer dans cette même classe d'âge. Le coût à la société a été estimé à 160 milliards d'euro par an, correspondant à 2% du rendement économique de l'union européenne [17].

Jusqu'à présent, les autorités publiques et l'industrie automobile ont été impliquées dans l'amélioration des conditions de sécurité routière par la prévention des accidents et par la réduction du nombre de blessés sur la route. La plupart des mesures préventives se sont focalisées sur le conducteur, alors que la réduction des conséquences d'un accident s'est concentrée sur la sécurité des véhicules et sur celle de l'infrastructure routière. Aujourd'hui, il est envisageable d'inclure dans les solutions potentielles visant à l'augmentation de la sécurité routière les développements techniques liés aux sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC). Ceux-ci peuvent en effet contribuer de manière significative à la réduction du nombre d'accidents de la route. Ces solutions se basent sur la

mise en œuvre des connaissances et méthodologies des sciences pour l'ingénieur pour la conception de solutions technologiques pouvant assister le conducteur dans tout ou partie de son activité de conduite [11]. Ainsi, plusieurs actions et travaux de recherche ont été menés dans le domaine de l'assistance à la conduite depuis les vingt dernières années pour l'amélioration de la sécurité routière. Par exemple, le projet européen « Prometheus » fut lancé en 1986 à l'initiative des industriels de l'automobile avec comme principaux objectifs de proposer des solutions pour augmenter la sécurité et harmoniser le trafic routier, de gérer les transports et surtout d'offrir une solution pour la conduite sûre (amélioration de la vision, évitement d'obstacle et alerte du conducteur). D'autres projets européens, plus récents, s'inscrivent dans la même optique comme CARSENSE¹ [33] ou ROADSENSE² [37] ou encore le réseau thématique européen ADASE³ sur l'assistance à la conduite [16]. En France, l'état soutient des projets de recherche dans le cadre des programmes PREDIT⁴. Le projet ARCOS⁵ (2001-2004) [31] « Action de Recherche pour une Conduite Sécurisée » est un des projets PREDIT récents ayant eu pour objectif l'amélioration de la sécurité routière en se basant sur l'amélioration de 4 fonctions de prévention d'accidents :

- Gérer les interdistances entre véhicules,
- Prévenir les collisions sur obstacles fixes, arrêtés ou lents,
- Prévenir les sorties de routes
- Alerter les véhicules en amont d'accidents.

Dans ce cadre, le laboratoire MIPS a été sensibilisé très tôt sur cette voie et notamment la sécurité active [5]. Plus généralement, de nombreuses études ont permis d'identifier les principaux facteurs accidentogènes : inattention, fatigue, malaise, assoupissement, alcool, vitesse excessive, interdistances réduites, conditions météorologiques défavorables, présence d'usagers vulnérables (piétons, ...), obstacles, défaillances mécaniques (en particulier les crevaisons de pneumatiques) [7]. Il demeure néanmoins bien connu (et des analyses le confirment encore couramment) qu'une erreur du conducteur est quasi systématiquement à l'origine des accidents. Les principales causes de défaillance du conducteur sont dues à un assoupissement au volant, à une somnolence ou à un problème de santé. La tâche de conduite demande un niveau optimum de vigilance pour garantir la sécurité routière. Plusieurs recherches montrent que l'altération de la vigilance est une cause d'accidents aussi importante que l'excès de vitesse et l'imprégnation alcoolique [26].

Les dernières statistiques réalisées auprès d'automobilistes en Europe, Asie et Etats-Unis montrent que les attentes concernant les véhicules de demain sont prioritairement liées à la sécurité et, en particulier, la sécurité active destinée à éviter les accidents. Le critère d'achat le plus important est donc la sécurité, citée par 65% des interrogés, devant la fiabilité (52%) et le confort (39%).

Dans ce contexte, les systèmes d'assistance à la conduite peuvent contribuer à l'amélioration de la sécurité du conducteur et des autres usagers de la route. Dans un premier temps, ils peuvent permettre au conducteur de prendre conscience de la dangerosité d'une situation de conduite et, dans un deuxième temps ils peuvent l'aider à contrôler son véhicule en cas de nécessité. Des dispositifs de ce type sont en cours d'élaboration, voire déjà sur le marché. Un système permettant par exemple d'avertir le conducteur en cas de franchissement latéral des marquages non signalé par la mise en route du clignotant est le système LDWS⁶. Ce dispositif est actuellement commercialisé sur certains véhicules du groupe PSA-Citroën. Citons également le régulateur de vitesse adaptatif (ACC⁷) qui assiste le conducteur cette fois dans sa tâche de contrôle du véhicule en l'aidant à conserver une distance de sécurité par rapport au véhicule qui précède. Néanmoins, du fait de leur indépendance, ces

¹ CARSENSE : « Sensing of Car Environment at Low Speed Driving ».

² ROADSENSE : « ROad Awareness for Driving via a Strategy that Evaluates Numerous SystEms ».

³ ADASE : « Advanced Driver Assistance Systems in Europe ».

⁴ PREDIT : Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres.

⁵ ARCOS : Action de Recherche pour une Conduite Sécurisée.

⁶ LDWS : Lane Departure Warning System

⁷ ACC: Adaptive Cruise Control

dispositifs ne pourront avoir qu'un impact limité sur l'accroissement de la sécurité routière. Il va de soi qu'une approche globale, fondée sur des assistances qui interagissent, des véhicules qui communiquent entre eux et avec l'infrastructure routière, conduira à de meilleurs résultats.

1.3. Ratio sécurité – confort

Les systèmes d'assistance à la conduite ont pour principal objectif d'améliorer la sécurité routière mais également le confort de conduite du conducteur. Cependant, il est souvent nécessaire d'effectuer un compromis entre ces deux objectifs qui peuvent s'avérer paradoxaux. Des systèmes conçus pour améliorer le confort du conducteur peuvent avoir un effet négatif sur la sécurité de celui-ci. Si l'on prend l'exemple d'un système de navigation, le guidage du conducteur se fait de manière vocale et visuelle pouvant distraire le conducteur dans sa tâche de conduite. Ainsi, la multiplication des systèmes d'aide à la conduite peut avoir un effet contraire sur la sécurité du fait de la distraction causée par ce type de dispositifs.

Il existe également le danger de submerger le conducteur par une quantité d'informations que celui-ci n'est pas en mesure de traiter instantanément. La démarche consiste alors à ne transmettre, à un instant donné, que l'information considérée comme essentielle. Enfin, il est également important de définir avec précaution la nature du signal d'avertissement de ces systèmes (signal sonore, visuel, haptique...) et ce en fonction de l'assistance fournie, de l'objectif à atteindre, ou de la situation de conduite considérée. Des études ergonomiques poussées doivent alors être accomplies pour garantir les niveaux de sécurité et de confort recherchés par l'élaboration de ces assistances à la conduite. Il convient de considérer un certain ratio entre la sécurité et le confort. Si l'on prend l'exemple du régulateur de vitesse adaptatif (ACC), ce système a été développé pour améliorer avant tout la sécurité routière (en garantissant une distance de sécurité avec le véhicule qui précède) et dans une moindre mesure pour contribuer au confort de conduite (en soulageant le conducteur d'une tâche potentiellement monotone). Cependant, cette assistance est actuellement lancée sur le marché en mettant davantage en avant le confort qu'elle prodigue au conducteur plutôt que l'aspect sécuritaire. Ceci montre également qu'indépendamment de l'objectif initial visé par le développement d'une assistance à la conduite, l'argument de vente peut être tout à fait différent, voire contradictoire⁸.

Les applications découlant de l'ACC ont toujours des imperfections. Ainsi, les dispositifs courants d'ACC permettent à l'utilisateur d'actionner le système dans des conditions pour lesquelles ils n'ont pas été conçus. Par exemple, tous les dispositifs d'ACC ne sont fonctionnels qu'aux vitesses au-dessus de 30 ou 40 km/h. Nous pourrions ajouter ici que ces systèmes ne devraient pas être activés en conduite de ville ou dans des conditions météorologiques défavorables. Et pourtant, aujourd'hui encore, ces systèmes peuvent tout à fait être actionnés en dehors des situations restreintes pour lesquelles ils ont été conçus et peuvent induire éventuellement des situations de conduite peu sûres [28].

Une application optimale d'assistance à la conduite doit améliorer l'activité de conduite tout en minimisant au maximum ses potentiels effets négatifs sur la sécurité et le confort.

1.4. Nouvelles technologies pour la sécurité et le confort

Dans le but de diminuer les accidents routiers, les équipementiers et constructeurs automobiles travaillent actuellement sur les aides à la conduite. Ces aides ont pour objectif d'améliorer la sécurité des passagers et des piétons tout en améliorant le confort véhicule. Ces nouveaux systèmes qui équipent de plus en plus les voitures exploitent l'électronique, l'informatique, la mécanique, la télécommunication, etc.

Si les problèmes de pollution étaient à l'origine de l'utilisation de l'électronique dans l'automobile, dans les années 1970 l'électronique a commencé à être utilisée pour l'amélioration de la sécurité et du

⁸ On cite par exemple l'ABS : Anti-lock Braking System (système électronique d'anti-blocage des freins).

confort. Actuellement, le coût des systèmes électroniques et informatiques embarqués représente 25% du prix total du véhicule. Ce pourcentage pourrait atteindre 40% en 2010 [7].

Les progrès notables des nouvelles technologies de l'information et de la communication ont bien évidemment favorisé l'émergence de nouvelles applications visant à améliorer la sécurité et le confort des conducteurs [11]. Ces applications, appelées aussi systèmes intelligents de transport, assurent plusieurs services : systèmes de guidage et de navigation embarqués, services d'informations interactifs, systèmes d'anticollision et de détection d'obstacles, services de télépéage, la communication route/véhicule, etc.

Les systèmes de navigation par GPS constituent une aide de type confort permettant le guidage du conducteur afin de suivre un itinéraire conseillé. Ces systèmes sont aussi utilisés pour renforcer l'aspect sécuritaire en exploitant leurs bases de données cartographiques. Ceci consiste essentiellement à fournir au conducteur des informations topologiques afin de l'informer sur les caractéristiques dangereuses d'un itinéraire [11].

L'automatisation de la conduite est un des objectifs directement liés aux possibilités offertes par les nouvelles technologies. Elle a été débutée en Europe dans le cadre du projet PROMETHEUS (« PROgramM for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Security ») au milieu des années 1980. Ce projet a pour objectif l'augmentation de l'efficacité et de la sécurité des transports sur autoroute [51]. Les systèmes développés nécessitent la mise en œuvre d'une communication entre l'infrastructure et les véhicules. Cette communication peut aussi être utilisée pour la diffusion en temps réel d'informations sur le trafic routier, de réactualisation d'informations de navigation. En outre, Comme le véhicule et ses occupants évoluent dans un environnement avec d'autres véhicules, la communication inter-véhicules est aussi utilisée pour des applications visant à améliorer la sécurité [11].

1.5. Apports des systèmes d'assistance à la conduite

1.5.1. Besoins du conducteur

Pendant la tâche de conduite, le conducteur observe son entourage de manière constante, où il doit évaluer en permanence les situations de conduite. Par conséquent, il doit décider sur les actions à entreprendre (accélérer ou ralentir, freiner, éviter, dépasser, etc.) [16]. La tâche de conduite devient plus difficile pendant certaines situations selon la densité du trafic, les conditions météorologiques, etc. Il vient se rajouter à cela l'état physique du conducteur (fatigué, sous l'empire d'alcool, manque de sommeil, etc.) qui rend cette tâche encore plus difficile. L'expérience du conducteur peut également avoir une influence sur cette tâche notamment en phase de perception. En effet, la principale différence constatée entre un conducteur qualifié de novice et un conducteur expérimenté se situe dans la prise d'informations qui est plus erronée et/ou plus incomplète chez le novice [51]. Ces informations utiles au conducteur sont celles qui le renseignent d'une part sur l'état et le potentiel de son véhicule et d'autre part sur l'environnement d'évolution du véhicule. Pour ces informations environnementales, sur l'ensemble des informations que le conducteur perçoit, environ 90% sont d'ordre visuel. Ceci confirme que la perception (recueil d'informations) est primordiale pendant la tâche de conduite. Elle représente une activité importante pour le conducteur afin d'évaluer l'environnement et d'entreprendre les actions nécessaires. Il a été montré que plus de 90% des accidents de la route sont dus à une erreur de conduite, souvent en raison d'une mauvaise perception, évaluation et interprétation de la situation de conduite [11] (cf. Figure 1-1). Il est donc nécessaire d'assister le conducteur dans sa tâche de conduite lui permettant la perception, l'évaluation et l'interprétation des situations de conduite avec anticipation.

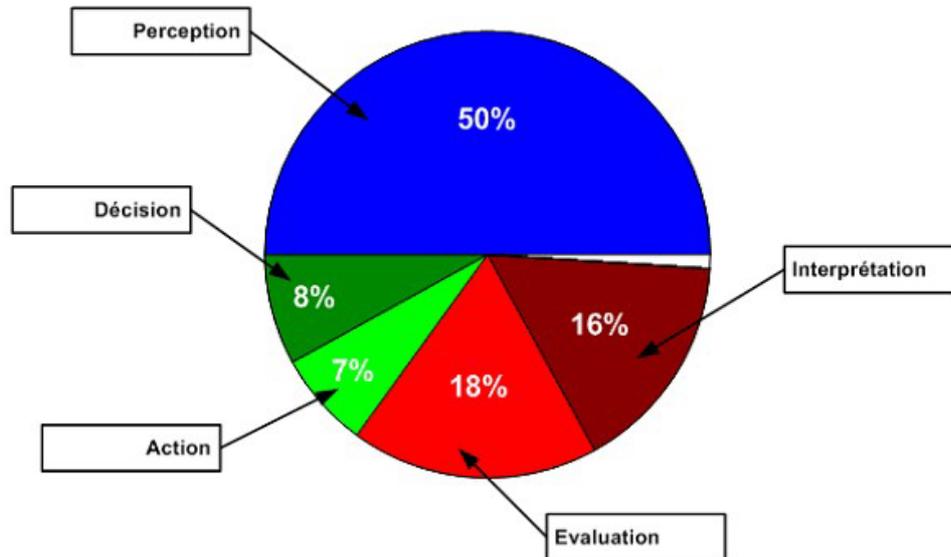


Figure 1-1: causes d'accidents dus aux défaillances humaines (Extraite de [11])

1.5.2. Assistance et niveaux de sécurité

Dans la sécurité routière on distingue deux types de sécurités : la sécurité passive et la sécurité active. La sécurité passive a été largement développée ces dernières années par les équipementiers et constructeurs automobiles. Elle a pour rôle de réduire les conséquences d'un accident lorsque celui-ci n'a pu être évité. La sécurité active a pour rôle, quant à elle, d'éviter les accidents. Ce type de systèmes équipe progressivement les véhicules.

Une autre classification de la sécurité routière consiste à décomposer les sécurités passive et active en trois domaines qui sont : la sécurité primaire, secondaire et tertiaire. Au premier domaine est associée une échelle de temps relative à un impact (cf. Figure 1-2) [11].

- La sécurité primaire : a pour principal objectif la prévention de l'accident grâce à une assistance apportée au conducteur [11]. Elle désigne toute action amenant à prévenir l'accident avant que ce dernier ne se produise. Les systèmes de prévention doivent principalement améliorer la visibilité et la perception de l'environnement.
- La sécurité secondaire : a pour objectif de réduire les conséquences de l'accident [11]. Elle consiste en des dispositifs de protection des passagers accidentés. Elle concerne à la fois la structure du véhicule et les systèmes de retenue (airbags, ceintures, détendeurs, sièges, etc.).
- La sécurité tertiaire : assure la gestion après l'accident qui concerne la prise en charge des accidentés par les pompiers et les équipes médicales. Elle consiste à réaliser les actions de protection pour éviter le sur-accident, d'alerter les services de secours et apporter les premiers secours [11].

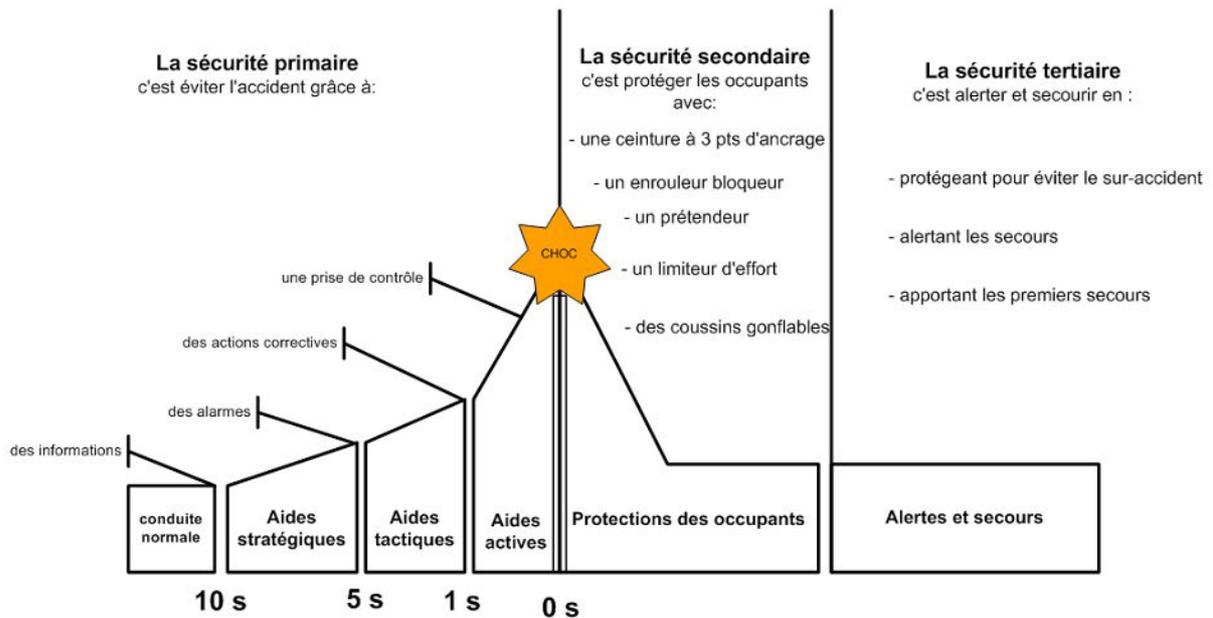


Figure 1-2 : Les domaines de sécurité routière (Extraite de [11])

1.5.3. L'assistance dans le système « Conducteur-Véhicule-Environnement »

Conduire est une tâche complexe dans laquelle le conducteur agit comme un contrôleur central pour réaliser des tâches de navigation, de guidage et de stabilisation [13]. Même si le conducteur constitue généralement une partie relativement sûre et fiable du système homme-machine, les erreurs ne peuvent totalement être exclues, particulièrement lorsque les limitations humaines en perception, traitements et actions sont atteintes. Ceci peut alors conduire à des situations dangereuses voire accidentogènes [13]. Pour cela, il convient d'assister le conducteur dans sa tâche de conduite et avant tout d'améliorer la phase de perception et d'analyse de la situation. L'amélioration de la perception passe alors par l'intégration sur le véhicule de capteurs permettant de mieux connaître l'état de ce dernier mais également par l'utilisation de sources extérieures d'informations caractérisant l'environnement proche du véhicule.

Dans l'optique du développement de systèmes intelligents d'assistance à la conduite, de nombreux facteurs doivent être pris en compte. Ces facteurs correspondent aux différentes interactions existantes entre les trois entités du système complexe : l'environnement, le conducteur et le véhicule (cf. Figure 1-3). Le conducteur, de part les informations qu'il perçoit sur l'environnement d'une part, et sur l'état de son véhicule d'autre part, détermine les consignes (actions de commande) à appliquer au véhicule pour mener à bien la tâche de conduite qu'il s'est fixée. Dans ce contexte, les assistances doivent être en mesure de contribuer à une meilleure perception et évaluation des situations de conduite afin de déterminer la nécessité d'une éventuelle intervention. Cette intervention peut alors être de nature passive sous forme d'information, de conseil et/ou d'alerte du conducteur (selon le niveau de danger de la situation par exemple) ou active, se traduisant alors par une adaptation des consignes de commande du conducteur à la situation (cf. §1.5.3.1). Dans le premier cas, le conducteur conserve la maîtrise des actions de commandes alors que dans le deuxième cas, l'assistance vient soit suppléer soit totalement remplacer les actions du conducteur.

Pour ce faire, ces systèmes doivent être convenablement intégrés dans la boucle « conducteur-véhicule-environnement » afin de détecter et diagnostiquer au mieux les erreurs d'évaluation du conducteur. Le principe d'intégration de l'assistance à la conduite consiste à minimiser les couplages directs entre l'automobiliste et son véhicule, au profit du système d'assistance à la conduite [51].

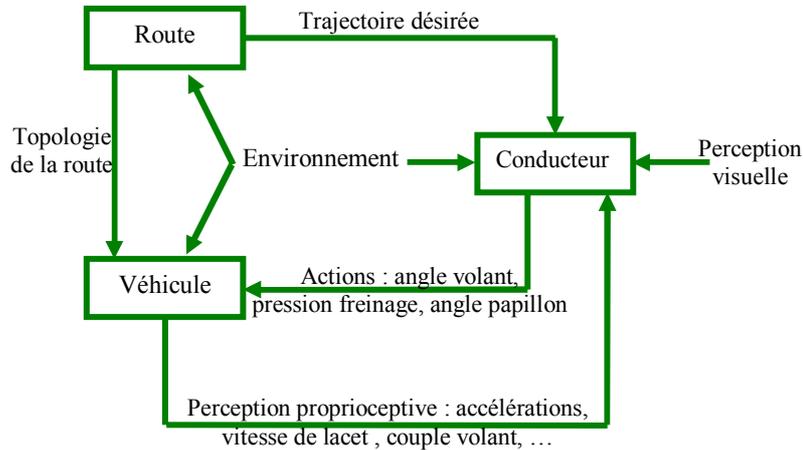


Figure 1-3 : Système « conducteur-véhicule-environnement »

1.5.3.1. Niveaux d'assistance

Le développement d'un système d'assistance à la conduite nécessite au préalable la définition d'un niveau d'assistance, et donc la définition de la nature de l'interaction entre le dispositif et le conducteur. Cette tâche consiste à choisir le niveau d'intervention du système d'assistance à la conduite dans l'activité du conducteur et permet de définir les niveaux de priorités de chacun dans la tâche de conduite. Cinq niveaux ont été distingués dans [51] :

- Information,
- Conseil,
- Avertissement,
- Assistance,
- Intervention.

Les trois premiers niveaux concernent l'assistance passive dans laquelle l'aide consiste à fournir au conducteur des informations tout en lui laissant les actions de conduite. Lors de l'émission d'informations, de conseils ou d'alertes, le conducteur conserve la totale maîtrise des actions de conduite [11]. Les deux derniers niveaux concernent l'assistance active permettant soit de renforcer l'action du conducteur pour assurer un suivi correct de ses décisions, soit même de prendre le contrôle momentané de la conduite si la situation l'exige. En effet, les actions de conduite du conducteur sont soit renforcées soit supplées par le système d'assistance à la conduite [11].

Lors de la sélection du type ou niveau d'assistance, des facteurs aussi variés que l'ergonomie, la psychologie, l'aspect cognitif ou encore juridique (liés à la réglementation) doivent être considérés.

De cette répartition des niveaux d'assistance se détachent deux structures de coopération entre le conducteur et le système d'assistance à la conduite : l'une verticale ou hiérarchique et l'autre horizontale ou hétérarchique [51].

1.5.3.2. Coopération Conducteur – Système d'assistance

Structure hiérarchique de prise de décision

Dans ce type de structure, la décision finale revient soit au conducteur, soit au système d'assistance à la conduite en fonction du type d'assistance prodigué (actif ou passif). Dans le cas des systèmes d'assistance informatifs, l'action à entreprendre sera décidée par l'automobiliste en tenant compte des informations ou des indications fournies par le système d'assistance. Dans le cas des systèmes actifs et de contrôle automatique (le régulateur de vitesse par exemple), le système d'assistance intervient de manière à générer une consigne en adéquation à la situation de conduite. Néanmoins, le conducteur

peut, à tout moment, intervenir et demeure prioritaire sur le système d'assistance [51]. Cette structure est illustrée sur la Figure 1-4.

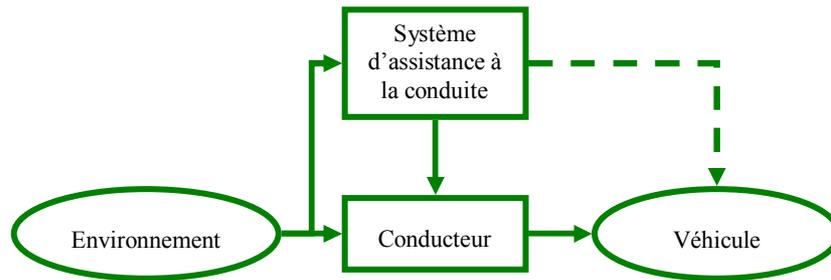


Figure 1-4 : Structure de coopération hiérarchique selon [51]

Structure hétérarchique de prise de décision

Dans ce type de structure, le conducteur et le système d'assistance sont au même niveau décisionnel. En effet, le conducteur reste le principal organe de commande mais à tout moment, il peut être remplacé par le système d'assistance ayant pour rôle la supervision dans le but de détecter et d'éviter des situations de conduite critiques. Un exemple de ce type de structure de coopération est celui du système de freinage d'urgence (ABS) qui agit de manière totalement transparente pour le conducteur. Ce dernier, lorsqu'il détecte une situation potentiellement dangereuse, a tendance à ne pas freiner suffisamment au départ, puis de trop (saturant les pneumatiques). Le rôle du système de freinage d'urgence est d'augmenter la pression de freinage au départ de la manœuvre avant de la réduire à la fin pour optimiser globalement la phase de freinage [51]. Cette structure est illustrée sur la Figure 1-5.

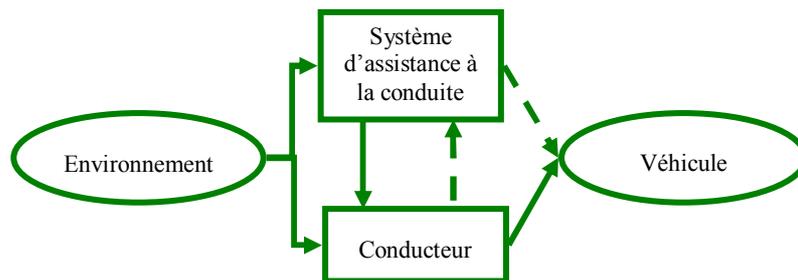


Figure 1-5 : Structure de coopération hétérarchique selon [51]

1.5.4. Exemples d'assistances

1.5.4.1. Assistances à la perception

Les aides à la perception du conducteur sont des aides permettant l'amélioration de la détection d'obstacles et des conditions environnementales sur la route. On cite ici quelques exemples d'aides à la perception :

- Les systèmes de navigation embarqués : ils s'appuient sur une cartographie électronique couplée à un système de localisation par GPS. Ils représentent une assistance de type confort qui consiste à guider le conducteur en lui définissant et signalant l'itinéraire à suivre. Cet itinéraire est calculé en fonction de la destination préalablement spécifiée par le conducteur. L'itinéraire peut être réactualisé en fonction des conditions de roulage et de la densité de la circulation. Ces informations sont obtenues par communication temps-réel avec des centres de surveillance et à travers le service TMC⁹. Les performances des systèmes de navigation embarqués sont fortement liées à la précision de la cartographie routière et à la nature des capteurs utilisés pour la localisation du véhicule (GPS, gyroscope, etc.) [51]. Les systèmes de navigation embarqués

⁹ TMC : « Traffic Messaging Channel ».

peuvent également être utilisés pour renforcer l'aspect sécuritaire dans le cadre des systèmes d'assistance exploitant la géométrie routière.

- Les systèmes à base de caméra : ils aident à l'amélioration de la perception. Ils permettent de réaliser plusieurs fonctions : détection d'obstacles, détection des panneaux de signalisation, détection des marquages au sol, détection de véhicules et de piétons, etc.
- De nouveaux capteurs intègrent de plus en plus les véhicules et permettent la détection des conditions environnementales, comme les capteurs de température, de pluie, de luminosité, etc. Les informations issues de ces capteurs peuvent être utilisées pour améliorer l'évaluation des conditions de conduite et de déclencher en conséquence, des systèmes particuliers d'aide à la conduite. Parmi ces systèmes on cite l'essuie-glace automatique dont le cadencement varie avec l'intensité de pluie détectée à travers le capteur de pluie. Grâce à ce système, la visibilité est en permanence optimale et le conducteur est ainsi déchargé d'une des tâches afin de se concentrer sur la tâche de conduite du véhicule.
- Les radars : ils sont utilisés pour la détection d'obstacles afin de prévenir les collisions. Ils sont donc utilisés pour des applications sécuritaires. Mais ils sont également utilisés pour des applications d'amélioration du confort comme le régulateur de vitesse adaptatif (ACC).

1.5.4.2. Assistances actives

On cite ici quelques exemples d'aides actives :

- Les systèmes de contrôle du châssis : ils ont fait une avancée significative ces dernières années. Ils permettent d'assurer la tenue de route, la stabilité, la manoeuvrabilité ainsi que le freinage du véhicule [56].
- Le système antiblocage des roues (ABS) : il permet d'éviter le blocage des roues en cas de freinage d'urgence. Il utilise les informations des capteurs de vitesse de roues reliés à un calculateur électronique qui gère le freinage. Aujourd'hui est associée à l'ABS une fonction appelée EBD (« Electronic Brake-force Distribution ») qui permet la gestion de la pression des freins.
- Le système de régulation électronique du comportement dynamique ESP¹⁰ : il permet le contrôle dynamique du véhicule. C'est une expansion du système ABS. Il permet d'éviter les sous-virages¹¹ et les sur-virages¹² en permettant au véhicule de garder la trajectoire. Il intervient si le véhicule a tendance à quitter sa trajectoire pour la corriger en agissant sur le système de freinage et l'injection d'essence au moteur.
- Système anti-patinage des roues TCS¹³ : il est destiné à limiter les patinages du pneu arrière lors des accélérations sur sol glissant en lui imposant un freinage jusqu'à ce que la motricité redevienne compatible avec le niveau d'adhérence [11].
- Systèmes de guidage et de suivi de trajectoire : ils sont destinés à prévenir les sorties de route, gérer les inter-distances entre véhicules, réaliser une localisation de bords de voies, etc. [11].
- Le régulateur de vitesse adaptatif ACC¹⁴ : est un régulateur de vitesse qui tient compte des véhicules précédents. Le véhicule qui précède est détecté dans un intervalle allant à environ 120m en utilisant des capteurs télémétriques (radar/lidar). Sa distance et sa vitesse sont ensuite évaluées. En utilisant ces données, le système calcule automatiquement la distance de sécurité et agit en conséquence sur le système de distribution du moteur et sur le freinage. Pour le moment, les constructeurs n'utilisent que 20% de la capacité de freinage pour que le conducteur garde la maîtrise et la responsabilité du comportement du véhicule. En effet, lorsque les freins sont actionnés par le conducteur, le système ACC est désactivé.

¹⁰ ESP : Electronic Stability Program.

¹¹ Sous-virage : le train avant glisse et l'automobile va tout droit au lieu de suivre la courbe.

¹² Sur-virage : le train arrière décroche et si la trajectoire n'est pas rétablie la voiture part en tête-à-queue.

¹³ TCS : « Traction Control System ».

¹⁴ ACC : « Adaptive Cruise Control ».

- Le système Stop-&Go : il représente une extension du système ACC. En conduite urbaine, il réduit la vitesse et stoppe le véhicule en fonction du trafic. Le véhicule repart automatiquement dès que le véhicule précédent a repris une certaine distance.

1.5.5. L'entité en charge de la conduite

1.5.5.1. Le conducteur au cœur du développement

Intégrer dans le système « Conducteur-Véhicule-Environnement » une entité chargée d'assister le conducteur durant la phase de conduite pose irrémédiablement la question de la gestion de cette assistance par le conducteur et de leurs interactions. Soulager le conducteur d'une part de son activité de conduite ou l'assister dans la perception de la situation nécessite la mise en œuvre de solutions qui par définition modifient, de façon mineure ou majeure selon le cas, le rôle du conducteur. Par conséquent, il est primordial lors de l'étude de systèmes d'aide à la conduite de tenir compte de l'être humain, de ses capacités d'analyse, de traitement et d'exécution ou encore de ses limites. C'est pourquoi, très souvent, la création d'assistance à la conduite s'appuie d'abord sur l'étude du conducteur et prend en compte le conducteur très tôt lors de la phase de conception. Cette démarche permet, en outre, d'identifier les caractéristiques principales de l'assistance ou la nature des signaux d'alertes les plus appropriés pour l'aide recherchée, afin de ne pas nuire au conducteur mais de garantir l'efficacité de l'assistance.

La solution consiste donc à intégrer le plus tôt possible l'utilisateur final (le conducteur) dans le processus de conception du système d'assistance. L'ergonomie intervenant à ce niveau, permet d'identifier les modifications comportementales du conducteur ou l'influence du système sur l'activité globale de conduite. L'assistance à la conduite (planification de parcours, régulation de vitesse ...) modifie l'activité de conduite dans sa globalité. Le conducteur se trouve ainsi déchargé d'une partie des activités qui lui incombent. En contrepartie, il est contraint de traiter d'avantage d'informations de ces systèmes d'assistance à la conduite. Ces informations sont souvent des indications visuelles, auditives ou sensitives [51].

1.5.5.2. Etude du conducteur

Pendant ces deux dernières décennies, l'analyse du comportement du conducteur a fait l'objet de nombreuses études. Ces études n'abordent souvent qu'un ou plusieurs aspects du conducteur en fonction de l'application traitée et ne traitent celui-ci que rarement de façon globale. Les différentes études du conducteur dans son milieu d'évolution (réel ou simulé) mènent généralement à trois résultats : le développement de modèles comportementaux, la classification du conducteur ainsi que son analyse comportementale. Dans le premier cas, le but est très souvent d'obtenir un modèle mathématique utilisable, entre autre, pour le développement et la mise au point de véhicules. Dans le deuxième cas, il s'agit, en fonction d'études statistiques le plus souvent, de définir le profil du conducteur (novice, expérimenté, ...) pour, à terme, élaborer un modèle cognitif [51].

Analyse comportementale

Nous avons précisé précédemment que la perception visuelle représente la grande majorité des informations sur lesquelles se focalise le conducteur pour définir sa stratégie de prise de trajectoire et effectuer des corrections si besoin est. Par conséquent, beaucoup de travaux dans le domaine des systèmes d'aide à la conduite ont pris en considération le comportement visuel du conducteur dans l'élaboration de leurs systèmes. L'analyse de la direction du regard demeure un axe privilégié dans ce domaine. Très souvent, du fait de la complexité de cette tâche, le comportement visuel est étudié dans une situation de conduite précise (virages, autoroute, etc.). C'est pourquoi, dans cette partie, il a été choisi de classer les travaux selon cette approche.

Analyse du regard en virages

Baujon *et al.* [5] ont développé un système d'analyse et d'étude du comportement visuel du conducteur (BASIL : « Behaviour Analysis and Studies Low-cost system ») qui permet d'analyser et de quantifier la direction du regard, le point de fixation, le temps de fixation ainsi que la concentration visuelle du conducteur tout en corrélant ces données avec celles issues du véhicule. En utilisant cet outil, des essais ont été réalisés dans des conditions réelles de conduite pour des conducteurs issus des classes « inexpérimenté » et « très expérimenté » d'après la classification de Rothengatter [69]. Il s'agissait d'étudier le comportement visuel de ces deux catégories de conducteurs en courbe et en ligne droite.

Dès le point de sortie du virage précédent, le conducteur « très expérimenté » se focalise sur le point d'entrée du prochain virage, avec quelques anticipations brèves sur l'intérieur du virage. Quant au conducteur « inexpérimenté », les zones de concentration restent nombreuses avec de constants changements de direction. La durée de fixation est deux fois plus longue pour le conducteur « inexpérimenté » que pour le conducteur « très expérimenté » aussi bien en courbe qu'en ligne droite.

Dans cette même optique, Nagata et Kuriyama [58] ont comparé le comportement visuel des conducteurs novices et expérimentés à basses vitesses. Les résultats ont montré que les déplacements angulaires horizontaux des têtes et des regards des conducteurs expérimentés sont plus grands que ceux des conducteurs novices.

Wilkie et Wann [82] ont constaté, quant à eux, que les conducteurs regardent progressivement vers la sortie virage lorsqu'ils s'approchent de son apex (le point de corde géométrique).

Land et Tatler [50] ont étudié les mouvements des yeux d'un pilote automobile pendant une pratique à pleine vitesse sur une route sinueuse afin de comparer son comportement visuel à celui d'un conducteur « classique ». Les essais réalisés dans des conditions pluvieuses ont montré que dans les virages, le pilote passe la plupart du temps à regarder près des points tangents aux bords intérieurs. Le point tangent est défini comme étant le point non – stationnaire, dans un virage, où la ligne de vision est tangente au bord interne de la route. Ces travaux ont mis en évidence une corrélation forte entre la direction de la tête du conducteur et la vitesse de lacet du véhicule 1 seconde après. D'après Apostoloff et Zelinsky [3], qui ont confirmé cette corrélation, la vitesse de lacet du véhicule représente un bon indicateur de la courbure de la route. Ce résultat a été obtenu lors d'essais sur conducteurs dans le but d'étudier les zones ainsi que le temps de concentration sur autoroutes et sur routes sinueuses. Finalement, ces travaux ont également montré qu'en général 92% de l'angle de regard est fourni par le changement de la direction de la tête et que seulement 8% est fourni par les mouvements des yeux.

Analyse du regard en changement de voie

Plusieurs études du comportement visuel du conducteur pendant une phase de changement de voie ont été réalisées. Parmi celles-ci, on citera celle de Takemura *et al.* [78] qui a montré que le point de fixation du conducteur se déplace du rétroviseur intérieur vers le rétroviseur extérieur juste avant le changement de voie (cf. Figure 1-6).

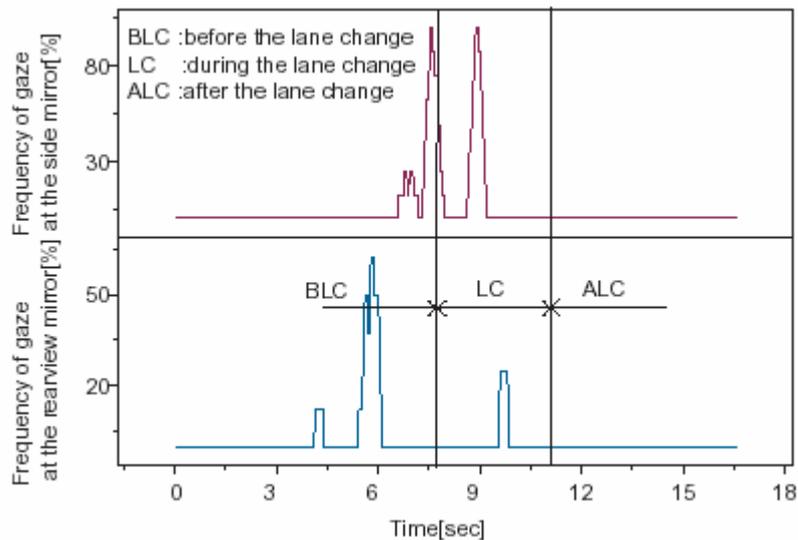


Figure 1-6 : Fréquences de regard des rétroviseurs intérieur et extérieur lors de changement de voie d'après [78]

Analyse du regard en intersections

Kitajima et Akamatsu [47] ont effectué des essais de conduite sur simulateur afin de mesurer et analyser les mouvements oculaires en intersections. Le choix de l'intersection est motivé par le grand nombre d'accidents dans cette situation de conduite. Trois tâches sont généralement observées dans cette phase de conduite : l'identification d'objets, le braquage et l'alignement. Ces tâches ont différentes caractéristiques en termes de mouvements oculaires. L'inspection des objets a pour but d'éviter les collisions en entrant à l'intersection. Elle est différente selon les conducteurs. Le braquage a pour but de conduire le véhicule le long du bord interne dans l'intersection. Pendant cette tâche, les conducteurs ont fixé différentes cibles (la ligne intérieure du bord, le bord) le long du bord pour le guidage du véhicule. L'alignement consiste à changer la direction après la sortie de l'intersection. Pendant le braquage et l'alignement, le mouvement des yeux n'est pas saccadé ; l'activité oculaire principale est le contrôle de la direction du véhicule. La vérification des procédures de sécurité devient alors secondaire, ce qui a des implications importantes sur une conduite sécurisante aux intersections. Néanmoins, le nombre de conducteurs qui ont participé aux essais n'est pas assez large pour envisager une généralisation des résultats.

Tous ces travaux présentés ci-dessus se sont intéressés au comportement visuel du conducteur en fonction de l'environnement d'évolution de son véhicule dans différentes situations de conduite (virages, changements de voie, intersections). Quelques autres travaux se sont intéressés au comportement visuel du conducteur à l'intérieur de l'habitacle de son véhicule notamment pour contrôler sa vigilance. En fait, plus de 90% des accidents graves de la route survenus en France, sont attribués à une défaillance du conducteur au volant. Les principales causes de défaillance sont dues à un assoupissement au volant, à une somnolence ou à un problème de santé. Ce pourcentage est à peu près le même en Europe, en Amérique du Nord et au Japon [46]. Ceci a motivé plusieurs auteurs à étudier la vigilance et en particulier la baisse de vigilance par diverses approches : études neurophysiologiques, des facteurs de dégradation, des moyens de détection ou encore des mesures de prévention. Plusieurs prototypes ont été développés pour la détection, en temps réel, de la vigilance du conducteur. Parmi les différentes techniques, une bonne précision a été accomplie par celles mesurant des données physiologiques telles que les signaux du cerveau, du cœur, etc. Ces solutions nécessitent d'équiper les conducteurs (attachement d'électrodes par exemple) et peuvent donc s'avérer trop intrusives. Des travaux récents ont utilisé des techniques sans contact. Parmi ceux-ci, on citera ceux de Smith et al. [76] basés sur des techniques sans contact. Leur prototype utilise une seule caméra montée sur le tableau de bord. Il permet le calcul du clignotement des yeux, l'information d'occlusion et la rotation de la tête pour évaluer la vigilance. Un autre prototype a été développé par Ji et yang [45] dans lequel

essentiellement une caméra vidéo CCD est utilisée. Il est basé sur le mouvement de la paupière, l'orientation du visage et la direction du regard (mouvement de la pupille). Ce prototype a été validé en simulations sur différents types de conducteurs (hommes et femmes d'âges divers) et sous différentes conditions d'éclairage.

Classification

La caractérisation du conducteur peut être obtenue également en étudiant des informations relatives à sa personnalité (sexe, âge...), en se basant sur ses actions et leurs conséquences (signaux mesurés sur le véhicule) ou encore en effectuant des relevés de signaux physiologiques qui nécessitent souvent d'équiper le conducteur. La méthode de classification choisie dépendra principalement de l'objectif attendu de l'étude. Ainsi, différentes classifications peuvent être faites à partir des informations physiques (sexe, âge et expérience), des informations proprioceptives (physiologiques, kinesthésiques), des informations visuelles ou encore à partir de la prise de trajectoires.

Classification à partir des informations physiques

Dans les études relatives au conducteur, le niveau d'expérience est très souvent évalué en fonction de la pratique de conduite : le conducteur est caractérisé par rapport à l'âge de son permis de conduire et au nombre de kilomètres parcourus. Ainsi Rothengatter a défini une classification (cf. Tableau 1-1) très largement utilisée dans les études statistiques du comportement du conducteur [69].

Catégories de conducteurs	Définition fondée sur le nombre d'années de permis de conduire et la pratique (kilométrage parcouru / xx dernières années passées)
Novice inexpérimenté	Permis < 1 an et pratique < 1000 km
Novice expérimenté	Permis < 1 an et pratique >1000 km
Conducteur inexpérimenté	1 an < Permis < 5 an et pratique < 10000 km / 5 dernières années ou : Permis > 5 ans et pratique < 10000 km / dernière année
Conducteur expérimenté	Permis < 5 ans et pratique < 100000 km / 5 dernières années ou : Permis > 5 ans et 10000 km / dernière année < pratique < 100000 km / 5 dernières années
Conducteur très expérimenté	Permis > 5 ans pratique > 100000 km / 5 dernières années

Tableau 1-1: Catégories de conducteurs selon Rothengatter [69]

Classification à partir des informations visuelles

L'analyse des informations visuelles du conducteur dans des phases de conduite spécifiques, réelles ou simulées (virages, intersections, autoroutes, ...) permet également d'aboutir à une typologie des comportements conducteurs ([9], [47], [48], [58], [74], [79]). Certains auteurs ont ainsi observé lors de leurs expérimentations des différences entre des conducteurs « expérimentés » et « inexpérimentés » tant au niveau du point de fixation que dans la durée de fixation du regard. Ces différences sont remarquables en lignes droites et en courbes : la durée de fixation des conducteurs « inexpérimentés » est plus longue, et le point de fixation est plus proche que celui des conducteurs « expérimentés » [5].

D'après Nagata et Kuriyama [58] d'une part, et Underwood *et al.* [80] d'autre part, le balayage horizontal du regard des conducteurs « expérimentés » est plus large que celui des conducteurs « novices ».

Classification à partir de la prise de trajectoires

Si la phase de perception diffère d'un conducteur à l'autre, il en va de même pour les actions de commande. Ainsi, l'analyse des conséquences des actions du conducteur (vitesses, profils d'accélération...) permet également de définir la catégorie d'appartenance de ce dernier. Une démarche originale consiste alors à classer le conducteur en caractérisant la trajectoire suivie par celui-ci ainsi que le profil de vitesse associé, en fonction du profil routier. Parmi ces travaux, on trouve ceux de Lauffenburger [51] dans lesquels une modélisation de la trajectoire et du profil de vitesse associé a permis de représenter deux classes de conducteurs (« inexpérimentés » et « très expérimentés ») selon la typologie de Rothengatter [69]. La Figure 1-7 illustre la différence de trajectoire, dans un même virage, pour les deux types de conducteurs étudiés.

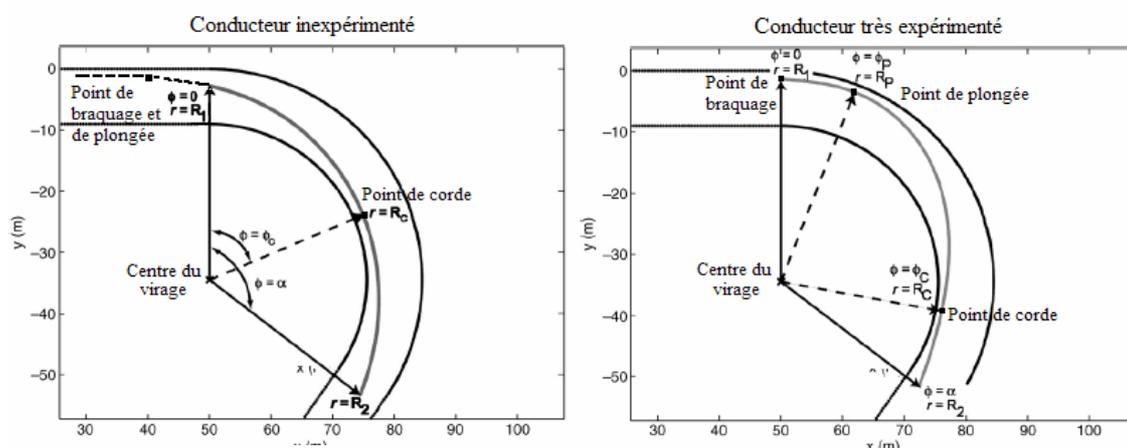


Figure 1-7 : trajectoires pour un conducteur « inexpérimenté » et un conducteur « très expérimenté » selon [51]

Classification à partir de mesures proprioceptives

Les signaux issus du véhicule, images des actions du conducteur, ont été utilisés dans différentes recherches sur le conducteur. Citons par exemple les travaux de Saroldi *et al.* [72]. Dans cette étude, l'outil d'identification du comportement du conducteur proposé s'appuie principalement sur l'analyse de certaines données proprioceptives relevées sur le véhicule (vitesse, distance, etc.). L'analyse statistique menée sur ces grandeurs permet d'établir une typologie de la conduite s'appuyant sur 3 classes :

- *Conduite calme* : la vitesse relative entre le véhicule et l'obstacle en amont est très proche de zéro et la vitesse du véhicule est presque constante. Le conducteur suit la vitesse du trafic.
- *Conduite sportive* : la vitesse relative entre le véhicule et l'obstacle en amont est négative, traduisant le fait que l'obstacle s'approche du véhicule et les fluctuations de la vitesse du véhicule sont grandes. Le conducteur va plus vite que la vitesse du trafic.
- *Conduite agressive* : la vitesse relative entre le véhicule et l'obstacle en amont du véhicule est fortement négative et les fluctuations de la vitesse du véhicule sont importantes. Le conducteur va beaucoup plus vite que la vitesse du trafic.

Modélisation

La modélisation d'un processus consiste à déterminer convenablement une représentation le décrivant. Ainsi, un modèle de conducteur est censé se comporter de façon similaire à un conducteur humain. Lors de la conception de véhicules, il est incorporé dans la simulation du système « conducteur –

véhicule – environnement » afin de pouvoir étudier les interactions entre les différents éléments de ce système. Le conducteur est donc vu comme un contrôleur qui régule sa trajectoire (direction, vitesse) sur la route en fonction de sa perception proprioceptive, lui donnant une image de l'environnement et de la réaction de son véhicule (cf. Figure 1-8).

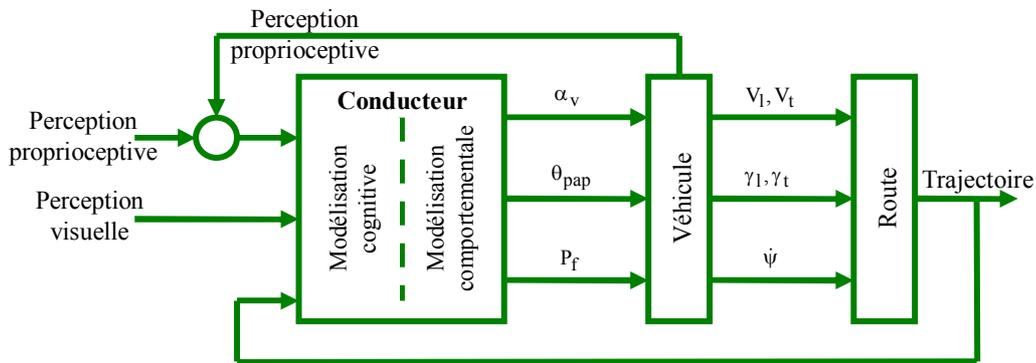


Figure 1-8 : Le conducteur vu comme un contrôleur en régulation de trajectoire

La modélisation du conducteur peut se faire autant d'un point de vue axé sur les actions, avec des modèles dits « comportementaux », que d'un point de vue psychologique avec des modèles dits « cognitifs ».

Modèles comportementaux

Dans cette optique, plusieurs approches ont été utilisées et peuvent être classées suivant trois catégories :

- les modèles continus : basés sur une représentation continue du conducteur.
- les modèles discrets : basés sur une représentation séquentielle du comportement du conducteur.
- les modèles hybrides : basés sur une représentation à la fois continue et discrète du conducteur.

A. Modèles continus

Parmi les modèles continus, on trouve par exemple les travaux de Afonso *et al.* [2] qui ont développé un modèle continu du conducteur reproduisant l'action d'anticipation de braquage en fonction de la vitesse du véhicule et de la courbure du chemin (Figure 1-9).

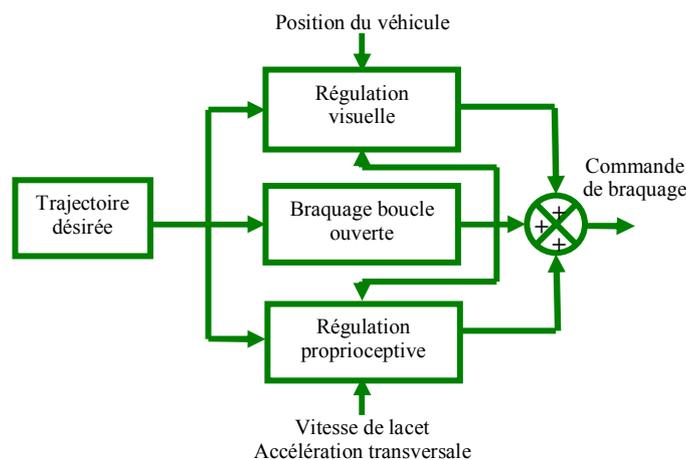


Figure 1-9 : Modèle du conducteur de Afonso et al. [2]

Ayant pour but suivre la trajectoire désirée, le braquage boucle ouverte donne une consigne absolue. Dans ce modèle, cette consigne est corrigée en utilisant les informations proprioceptives (vitesse de lacet, accélération transversale) et les informations anticipatives visuelles de la trajectoire.

Afonso *et al.* [2] mais aussi Kondo et Ajimine [48] affirment également que le conducteur concentre son attention sur certains points de la route. Ces points occupent environ 90% de son temps et il les fixe pendant quelques instants. Ces points sont appelés «points objectifs». Chacun d'entre eux sera son objectif de trajectoire pendant quelques instants et un nouvel objectif apparaîtra avant même que le conducteur n'arrive au premier point focalisé. La localisation d'un «point objectif» dépend de l'expérience du conducteur et de la visibilité.

B. Modèles discrets

Les premiers modèles discrets ont été développés au début des années 60 dans le but de représenter l'activité de suivi d'un véhicule (régulation de vitesse en fonction d'un véhicule cible). Ces modèles intégraient un paramètre temporel relatif au temps de réaction du conducteur, ou au caractère prévisionnel de certaines de ses actions.

Le conducteur se comporte comme un système de surveillance : lorsqu'un indicateur de son choix dépasse un seuil qu'il s'est fixé, une action est entreprise [51]. Ainsi, des indicateurs tel que le TLC («Time to Line Crossing») ou encore le TTC («Time To Collision») ont été introduits pour modéliser le conducteur dans des tâches de maintien du véhicule dans la voie, la gestion d'inter – distances entre véhicules ou le contrôle longitudinal «Stop and Go». Récemment, ces indicateurs ont donné lieu au développement d'assistance à la conduite se basant sur ces notions pour l'alerte du conducteur ou le déclenchement d'actions de correction [55].

C. Modèles hybrides

Les modèles hybrides ont pour but la représentation réaliste du comportement du conducteur, y compris la charge mentale et l'aspect cognitif de résolution des problèmes. Parmi ces modèles, on trouve le modèle de Majjad *et al.* [53] qui manipule tous les processus cognitifs de l'opérateur humain. Il est capable de reproduire le comportement de trois types de conducteurs (« inexpérimenté », « normal » et « expérimenté »). Il prend en compte les dynamiques latérale et longitudinale par l'intermédiaire de deux contrôleurs : un contrôleur latéral minimisant le déplacement latéral dans la voie et un contrôleur longitudinal déterminant la vitesse. Le choix de cette vitesse dépend du type du conducteur, de la route et du trafic. La détermination de la vitesse désirée est réalisée en utilisant un automate d'états finis. Les simulations ont montrée une bonne performance pour les trois types de conducteurs.

Modèles cognitifs

La plupart des modèles de ce type poursuit le même objectif : établir l'interface entre un système d'information et le conducteur afin que le système d'informations réponde aux besoins spécifiques d'un conducteur donné [11]. Dans ces modèles, durant l'activité de conduite, la structure conducteur – véhicule peut être assimilée à une architecture de collaboration homme–machine, où le conducteur est considéré comme un opérateur. Le modèle le plus populaire est le modèle comportemental hiérarchisé proposé par Rasmussen [65]. Ce modèle dispose de trois niveaux raccordant la phase de prise d'informations aux actions de commande suivant trois mécanismes décisionnels (Figure 1-10) :

- *Skill-based Behaviour* ou comportement basé sur l'entraînement : l'opérateur exécute des actions de manière totalement inconsciente s'apparentant à des réflexes à partir d'un apprentissage de séquences opératoires fonction de la pratique.
- *Rule-based Behaviour* ou comportement basé sur une base de règles (comportement «procédural») : face à une situation déjà rencontrée par le passé, l'opérateur peut réagir suivant des règles pré-établies.
- *Knowledge-based Behaviour* ou comportement basé sur la connaissance : intervient lors d'une situation nouvelle ou aucun apprentissage ni aucun système de règles ne peut amener l'opérateur à

la solution. Il adapte alors ses raisonnements et tente de prédire l'évolution du système par rapport à des actions qu'il aura effectuées.

Le principal intérêt de l'étude cognitive est de comprendre la manière avec laquelle le conducteur établit son jugement pour définir les actions nécessaires au bon déroulement de la tâche de conduite.

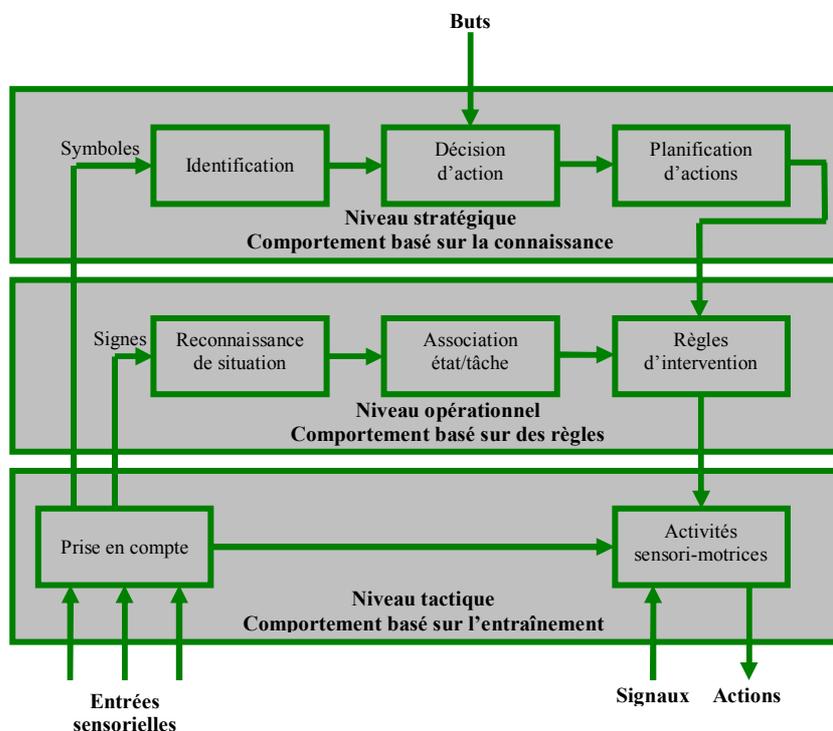


Figure 1-10 : Modèle cognitif d'après Rasmussen [65]

1.5.6. Les impacts de l'assistance sur le conducteur

1.5.6.1. La prise de risque

Les systèmes d'assistance à la conduite ont pour objectif l'amélioration de la sécurité et du confort du conducteur. Cependant, ces systèmes peuvent aussi constituer un risque, par exemple lorsqu'ils sont utilisés dans des situations de conduite pour lesquelles ils n'ont pas été conçus. Ce risque peut arriver si les interfaces de ces systèmes d'aide à la conduite sont mal conçues et sollicitent trop l'attention du conducteur, si leur fiabilité n'est pas suffisante et si leur usage est détourné par le conducteur. Par conséquent, il faudra limiter l'information fournie au conducteur à celle qui lui est exactement nécessaire, à ne pas l'encombrer notamment dans les phases d'urgence. Certains spécialistes pensent qu'il existe pour un conducteur donné un niveau de risque accepté (théorie de l'homéostasie du risque). Si les conditions objectives de sécurité se modifient, le comportement se modifie également de manière à ce que l'activité du conducteur se trouve réduite et le seuil de risque accepté soit à nouveau atteint [13]. Il convient alors, de ne pas réduire l'activité de conduite à un seuil qui pourrait être néfaste, et d'autre part d'intégrer dans les systèmes d'aide une phase de supervision du conducteur [51]. On peut craindre également que l'augmentation de la sécurité objective de certaines catégories d'utilisateurs (les automobilistes par exemple) n'aggrave le risque d'autres utilisateurs plus vulnérables (les piétons par exemple), probablement à cause de modifications de comportement des utilisateurs bénéficiaires du surcroît de la sécurité [13].

1.5.6.2. L'acceptabilité d'assistance

L'expérience a pu montrer par le passé¹⁵ que la conception d'un système d'assistance doit obligatoirement être accompagnée de travaux sur l'acceptabilité et l'utilisabilité du dispositif par le conducteur. L'ergonomie dont il s'agit ici a un rôle primordial dans la conception d'un système d'assistance à la conduite puisqu'elle permet, entre autres, de parfaitement définir la répartition des tâches entre le conducteur et le système d'assistance. Elle sert aussi à sélectionner les informations et la manière (sonores, visuelles, ...) dont il faudra les prodiguer au conducteur [51].

Le risque de conflit entre le conducteur et le système d'assistance pose des problèmes d'acceptabilité et de responsabilité. Les difficultés rencontrées dans le contexte du contrôle longitudinal, l'ACC par exemple, préfigurent des problèmes plus difficiles. Afin que ce système d'assistance soit accepté par le conducteur comme une réelle aide à la conduite avec un comportement prévisible, il n'est pas suffisant de minimiser l'erreur de distance. Le système d'assistance doit de plus se comporter de façon similaire au conducteur humain. Afin de garder le conducteur dans la boucle de contrôle, il est nécessaire de l'informer sur les positions de l'actionneur proposées par le système [13]. De plus, pour garantir un fonctionnement satisfaisant, cette technologie doit être capable, lorsque le véhicule se rapproche à grande vitesse d'un véhicule qui le précède, de distinguer un risque de collision et une intention de dépasser.

1.5.7. Intérêts des capteurs virtuels pour l'assistance à la conduite

Les capteurs virtuels sont de plus en plus utilisés dans les systèmes d'assistance à la conduite. Un capteur virtuel est un algorithme qui calcule la valeur d'une variable qui n'est pas mesurable directement. La raison de l'indisponibilité d'une mesure peut être que la variable n'est physiquement pas mesurable ou qu'un capteur dédié à cet effet serait très coûteux en production de masse [25].

Si l'on prend l'exemple de l'information de la vitesse de lacet, plusieurs systèmes d'assistance à la conduite en ont besoin. Par exemple, un régulateur de vitesse adaptatif (ACC) nécessite une information précise de la vitesse de lacet. Or, l'utilisation d'un capteur de vitesse de lacet souffre d'un problème inévitable de mesure d'offset qui varie dans le temps. Cette variable peut alors être déterminée par le biais du calcul du rayon de courbure de la route à partir des vitesses angulaires des roues données par les capteurs de vitesses respectifs du système ABS. Mais dans ce cas encore, il y a un offset dû à la connaissance imparfaite des rayons des pneumatiques. En intégrant les informations des capteurs de vitesse de lacet et des vitesses du système ABS, ces deux offsets peuvent être estimés avec précision en utilisant le concept de capteur virtuel : un filtre adaptatif ou un filtre de Kalman peuvent être utilisés. Le filtre de Kalman a l'avantage d'atténuer les bruits de mesure. Un capteur virtuel de vitesse de lacet à haute précision est ainsi obtenu [24].

D'autres capteurs virtuels peuvent aussi être réalisés en utilisant uniquement les capteurs des vitesses des roues qui peuvent être pris à partir du bus CAN. Ces capteurs virtuels sont ceux de la pression des pneus et de la friction de la route [25].

Un autre type de capteur virtuel peut être obtenu à partir des systèmes de navigation. Ce capteur est appelé « horizon électronique ». L'horizon électronique est un concept important des systèmes de navigation. Il présente une image de la route en amont du véhicule. Cet horizon est obtenu à partir des systèmes de navigation à travers une plateforme hardware (incluant une unité de traitement, capteurs de positionnement incluant un récepteur GPS, gyroscope, etc.) et des modules logiciels. Cependant, il n'est pas un capteur au sens conventionnel : il peut être vu comme un capteur virtuel fournissant les informations à partir d'une cartographie. En se basant sur la position actuelle du véhicule, l'horizon électronique fournit les informations sur les segments de route en amont du véhicule [64]. Ce capteur est utilisé dans le développement des systèmes d'assistance à la conduite ayant besoin de la perception

¹⁵ On citera par exemple l'ABS qui a été conçu pour augmenter la sécurité. Par la suite, les constructeurs se sont rendus compte d'un effet pervers qui n'a pas été décelé lors de sa conception. En effet, pour les conducteurs ce système avait pour objectif d'optimiser le système de freinage. Or, il est connu que la distance d'arrêt d'un véhicule équipé d'un ABS est supérieure à celle d'un véhicule ne contenant pas ce système. Cette constatation pose le problème de la perception du système par le conducteur et de la modification du mode de conduite de celui-ci [51].

de l'environnement du véhicule. Les approches développées dans le cadre de cette thèse sont basées sur ce capteur virtuel.

1.5.8. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le contexte de la sécurité et de confort routiers. Ceci est pour introduire dans la suite le contexte de la thèse. Il a présenté en outre l'apport des systèmes d'assistance à la conduite ayant pour principal objectif l'amélioration de la sécurité routière et la réduction du nombre d'accidents. Pour ces systèmes d'aide à la conduite la considération du système complet « Conducteur-Véhicule-Environnement » est primordiale. Dans ce chapitre la modélisation et la classification conducteur a été présentée comme celui-ci représente le cœur de ce système. Ce qui a pour but de l'intégrer dans la boucle de commande ou à le classifier afin d'individualiser le système d'aide à la conduite en fonction du type de conducteur : novice, expérimenté, etc.

2. Chapitre 2 : Le projet NAFS : les Systèmes d'Information Géographique au service de l'éclairage AFS

2.1. Introduction

L'éclairage automobile vit sa première mutation fonctionnelle d'importance. Si le style et la fiabilité des phares ont fortement progressé ces 40 dernières années, leurs périmètres fonctionnels sont restés constants, en l'occurrence :

- Fournir un faisceau de croisement réglementaire (les « codes ») ;
- Fournir un faisceau de plein phare réglementaire (les « routes ») ;
- Optionnellement fournir un faisceau anti-brouillard ;
- Signaler par lanternes et clignotants.

La Figure 2-1 présente l'éclairage automobile actuel où tous les faisceaux de lumière des véhicules sont de tailles et de formes identiques. Ce type d'éclairage ne permet pas d'aider le conducteur à s'orienter sur le profil routier. De plus, les phénomènes d'éblouissement risquent de troubler la conduite d'automobilistes se croisant lorsque les conditions météorologiques sont défavorables.

La DS a marqué les esprits en France voici 30 ans avec un faisceau tournant selon les mouvements du volant. Le faisceau ainsi déplacé n'était que les pleins phares, la réglementation interdisant de faire de même avec les codes. La raison en était que les pleins phares ne sont utilisables (par définition) qu'en l'absence de tout véhicule susceptible d'être ébloui : une commande défaillante ou inappropriée de cette nouvelle fonction ne peut ainsi avoir de conséquence grave.

La réglementation des codes est a contrario beaucoup plus rigide. Elle assure que le faisceau possède une limite très précise entre la zone basse éclairée et la zone supérieure sombre dans laquelle se trouvent les yeux des conducteurs venant en sens inverse. En l'état, la réglementation n'autorise aucune déformation du faisceau code, et il aura fallu attendre 2003 pour que celle-ci évolue de manière à permettre un mouvement bien identifié connu sous le nom de « Code Virage » ou *Bending Light*.



Figure 2-1 : Système d'éclairage actuel

En 2008, une deuxième évolution de la réglementation des codes permettra 3 autres déformations du faisceau :

- Le « Code Autoroute » ou *Motorway Lighting* (ML) qui permettra d'éclairer plus loin sur autoroute ;
- Le « Code Ville » ou *Town Lighting* (TL) qui permettra de limiter les éblouissements en ville et d'améliorer l'éclairage latéral ;
- Le « Code Pluie » ou *Adverse Weather Lighting* (AWL) qui minimisera les éblouissements par réflexion sur chaussée mouillée, et optimisera l'éclairage proche et des bas cotés ;

Ces trois types de code, ainsi que le code virage, entrent dans un cadre réglementaire dénommé AFS pour *Adaptive Front-Lighting System*.

La plupart des constructeurs et équipementiers d'éclairage explorent actuellement les différents modes de réalisation possible de ces nouvelles fonctions, et étudient la pertinence, l'efficacité, mais aussi les dangers associés à l'utilisation d'informations issues du véhicule ou de l'environnement. Ainsi, des fonctions AFS comme le ML et le TL ont besoin d'informations contextuelles (nature de la voie, du site,...) pour être activées. Ces informations sont délivrables par un système de navigation s'appuyant sur une cartographie routière numérique d'une zone étendue.

L'objectif de ces nouvelles fonctions d'éclairage est l'amélioration de la perception et de l'interprétation de la tâche complexe de conduite nocturne. Dans ce contexte, le conducteur conserve la responsabilité des actions sur le véhicule, l'assistance ne lui permettant que de lui faciliter la prise de décision grâce à une perception accrue.

Ce chapitre présente un état de l'art des systèmes de navigation par GPS et des systèmes d'éclairage AFS avec une présentation détaillée du projet NAFS dans lequel s'inscrivent les travaux de cette thèse.

2.2. Systèmes de navigation

2.2.1. Principes

Une des avancées intéressantes dans le domaine du transport ces dix dernières années concerne l'introduction de systèmes de navigation intelligents. Ces systèmes sont conçus pour acquérir, analyser, communiquer et présenter l'information aux conducteurs pour leur permettre de se déplacer d'un endroit à un autre [13]. Le système de navigation propose à l'automobiliste un itinéraire extrait

d'une carte numérique du réseau routier selon un critère donné. Le rôle de l'aide au conducteur est réalisé grâce à une double interface vocale et visuelle. Le système peut recevoir et intégrer des informations de trafic TMC (*Traffic Message Channel*) reçues par le canal numérique RDS (*Radio Data System*) de la bande FM [49].

Dans la plupart des systèmes de navigation modernes, on combine une série de capteurs afin d'obtenir une information de position fiable et précise. Un système de navigation consiste en plusieurs composants ou modules pouvant communiquer les uns avec les autres [20], [81]. Ceux-ci sont détaillés ci-dessous et illustrés sur la Figure 2-2 :

- base de données cartographique : base de données géographique décrivant le réseau routier. Elle contient des données géométriques et des attributs associés aux segments de la carte. Afin d'harmoniser le contenu et le format de ces données, certains fabricants des systèmes de navigation et des bases de données cartographiques ont créé une norme ISO internationale, le GDF (*Geographic Data File*). Cette norme définit la manière dont les routes sont codées (représentées) pour être correctement interprétées par les systèmes de navigation.
- localisation et *map-matching* : les systèmes combinent plusieurs capteurs comme un récepteur GPS, un gyroscope et un odomètre pour calculer la position instantanée la plus précise et la plus fiable possible. Quand la réception des signaux du GPS est difficile, ou même impossible (zones urbaines ou tunnels), les signaux issus d'un gyroscope mesurant la vitesse angulaire et d'un odomètre mesurant la distance parcourue sont rajoutés en utilisant une méthode de navigation à l'estime dite *Dead Reckoning* (DR). L'approche de DR s'appuie sur la théorie de la fusion de données et, en particulier, sur les techniques d'estimation. Ainsi, la précision du GPS et la disponibilité des mesures de la navigation à l'estime sont combinées pour garantir une précision de positionnement convenable par rapport à l'objectif de guidage. Afin de combiner l'information de position calculée et les données de la carte routière numérique, des algorithmes de *map-matching* (corrélation cartographique), sont implémentés. Ils projettent la position calculée du véhicule à la position la plus probable sur le réseau routier.
- Planification d'itinéraire : il calcule le "meilleur" itinéraire (par exemple le plus court ou le plus rapide) à partir de la position actuelle vers une destination connue. Les systèmes de navigation les plus récents intègrent des messages de perturbation du trafic. Ceci permet d'optimiser le calcul de l'itinéraire en fonction des conditions de trafic en temps-réel.
- Guidage : il détermine les instructions de conduite de sorte que le conducteur puisse suivre l'itinéraire calculé sans difficulté.
- IHM (Interface Homme Machine) : elle fournit au conducteur les informations relatives à la navigation d'une manière vocale et visuelle.

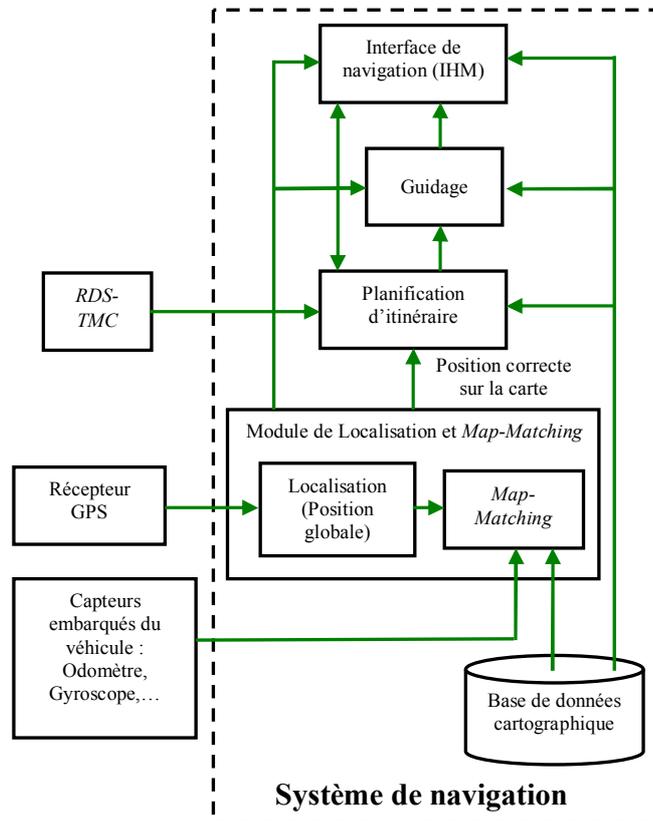


Figure 2-2 : Architecture d'un système de navigation

2.2.2. Etat de l'art

Il existe plusieurs systèmes d'information géographique (SIG) ayant pour principal objectif la navigation et ayant été utilisés dans le cadre de projets visant à développer des systèmes d'aide à la conduite. Les plus utilisés, ainsi que celui retenu dans le cadre de cette thèse (ADASRP de la société Navteq), sont décrits dans cette section.

2.2.2.1. GEOROUTE[®] et GEOCONCEPT

GEOROUTE[®] est une base de données précise de l'IGN¹⁶ contenant des adresses et adaptée aux multiples applications de calcul d'itinéraires, de la localisation d'adresses et du rattachement des données externes. Elle a pour but de positionner toutes les adresses, d'analyser des données commerciales et statistiques et d'optimiser les déplacements routiers [38].

Dans le cadre du projet SAACAM¹⁷, un système permettant d'accéder à une carte IGN GEOROUTE[®] précise a été développé sur la base du système d'information géographique GEOCONCEPT. GEOCONCEPT est un logiciel ouvert du point de vue des différents formats de bases de données qu'il supporte (IGN, NAVTEQ ou autres). Le logiciel fournit un kit de développement permettant l'accès au moteur cartographique et à son interface utilisateur [16].

2.2.2.2. ADASRP

Le système de navigation ADASRP (« Advanced Driver Assistance Systems Research Platform ») est une application de la société NAVTEQ destinée au développement d'assistances à la conduite et

¹⁶ IGN : Institut Géographique National.

¹⁷ SAACAM : Systèmes Actifs d'Aide à la Conduite pour AMéliorer la sécurité automobile.. SAACAM est une aide à la conduite consistant en un système de conseil de vitesse excessive [7].

permettant aux concepteurs d'accéder facilement aux données liées à une cartographie routière. Il entend donner un accès complet aux données cartographiques pertinentes (géométrie de la route, attributs de la base de données, etc.), contrairement aux systèmes de navigation classiques qui sont autonomes et fermés. C'est un outil couramment utilisé par les constructeurs et équipementiers automobiles pour le prototypage des applications d'aide à la conduite utilisant une cartographie routière.

ADASRP se compose d'une partie logicielle et d'une partie matérielle dénommée *SensorBox*. Ce boîtier intégrant différents capteurs est un dispositif de positionnement constitué entre autres d'un GPS et d'un gyroscope dont les performances sont identiques aux capteurs actuellement employés dans les systèmes de navigation disponibles pour le grand public. La partie logicielle contient entre autres une API¹⁸ NavTools constituée d'une bibliothèque de routines pour le positionnement du véhicule, l'affichage de la carte ou le calcul d'itinéraire.

Les données sont stockées dans une base de données au format SDAL¹⁹ et éventuellement dans une base de données complémentaires LAD (*Look Aside Database*). Cette dernière peut être créée, sur des pistes de test, par NAVTEQ selon les besoins de l'utilisateur et décrivent avec plus de précision la géométrie de la route. ADASRP est décrit plus en détail dans le chapitre 5.

2.2.2.3. MapInfo

MapInfo est un logiciel modulaire. C'est un outil de type SIG qui sert à créer, à traiter et à cartographier de l'information géographique. L'organisation des données sous le format MapInfo utilise des graphes nommés afin de représenter les relations spatiales entre les différents éléments de la cartographie. Cet outil est généralement apprécié pour ses bonnes performances dans l'accès aux données [68].

2.2.2.4. ArcGIS

ArcGIS est un ensemble de logiciels SIG réalisé par la société ESRI [36]. Différents environnements de développement sont déployés au sein de ArcGIS, parmi lesquels :

- ArcView : version de base.
- ArcEditor : version de base + fonctionnalités topologiques et d'édition.
- ArcInfo : ArcEditor + modules supplémentaires très puissants. ArcInfo est un ensemble de bibliothèques généralistes et de plusieurs logiciels optionnels, selon l'utilisation envisagée (ArcView, ArcScan, ArcStorm, Network Analyst, 3D analyst, Spatial Analyst) [68].

2.2.2.5. MapSensor

Le logiciel MapSensor de la société NAVIGON [39] est adapté aux exigences des systèmes d'aide à la conduite. Sa structure est présentée sur la Figure 2-3. MapSensor utilise les cartes routières numériques pour fournir des informations complémentaires sur l'environnement du véhicule au système d'aide à la conduite. Il calcule la position actuelle du véhicule à l'aide des données GPS, de la vitesse et de la direction du déplacement. Cette direction est calculée en utilisant un gyroscope et l'angle au volant. Il permet l'extraction d'informations et d'attributs à partir d'une carte routière numérique, dans une zone définie autour de la position du véhicule et appelée *GeoHorizon*. Cet horizon contient entre autres les croisements, les types de route (autoroute, route de campagne, chemin, etc), les rayons de courbures des virages calculées (selon la courbe de bézier ou B-Spline), les panneaux de signalisation et les limitations de vitesse, qui sont récupérés en accédant aux données de la carte routière. En utilisant ces informations, le logiciel calcule la trajectoire du véhicule la plus probable (« Anticipation de la

¹⁸ API : *Application Programming Interface*.

¹⁹ SDAL : *Shared Data Access Library*. Le format SDAL est un format standardisé des cartographies routières de NAVTEQ.

trajectoire »), ainsi que les virages le long de la route. Un décodeur de panneaux de signalisation permet de convertir les indications de la carte routière. MapSensor peut alors fournir toutes ces données précalculées au système d'aide à la conduite par le biais du bus CAN. Ce SIG est très similaire à l'outil ADASRP retenu dans le cadre de ce travail.

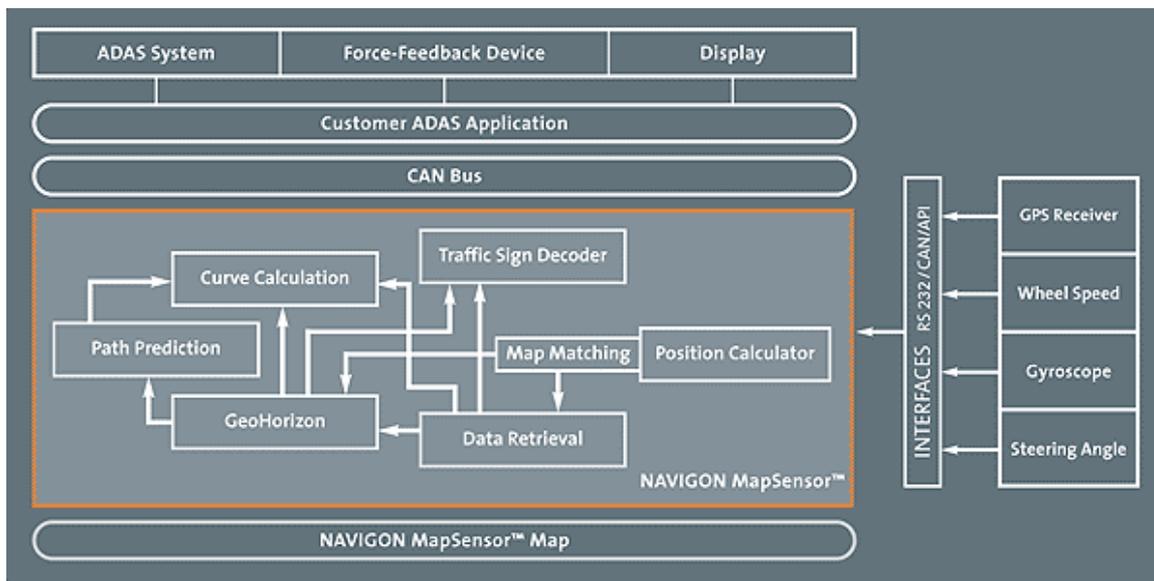


Figure 2-3 : Structure de MapSensor (Extraite de [39])

2.2.2.6. SIV SDK de la société BeNomad

Les produits SIV de la société BeNomad [32] sont des kits de développement d'applications et de services cartographiques. Ce kit de développement en C++ a notamment été utilisé lors du projet MobiVip²⁰ [43], [66]. Ce SDK²¹ est un ensemble de bibliothèques et structures de données, orienté objet, pour le développement d'applications utilisant des informations géographiques sur des systèmes nomades.

Le SDK propose quatre modules [7] :

- Géocodage (*Geocoding*) des adresses et des points d'intérêt permettant la localisation à partir d'une description textuelle du lieu et vice-versa.
- Affichage (*Rendering*) permettant la visualisation d'une cartographie interactive.
- Gestion de flotte (*Fleet Management*) permettant l'exploitation de différents types d'éléments dynamiques comme les positions, les trajets ou historiques et gérer un parc de véhicules.
- Calculs d'itinéraires (*Routing*) permettant le calcul d'un itinéraire représentant le chemin optimal entre deux points (selon un critère temporel ou spatial) appartenant au réseau routier, avec éventuellement des points de passage.

2.2.3. Le positionnement par GPS

2.2.3.1. Historique

Le système de positionnement GPS²² a été conçu par le Département de la Défense des Etats-Unis (*DoD*) au début des années 1970. Les quatre premiers satellites prototypes ont été lancés en 1978. Une constellation de 24 satellites opérationnels a été complétée en 1993. Ces satellites situés en orbite haute

²⁰ MobiVip : Véhicules Individuels Public pour la Mobilité en centre ville. Projet de recherche soutenu par le PREDIT de janvier 2003 à janvier 2007.

²¹ SDK : *Software Development Kit*.

²² GPS : *Global Positioning System*.

de 20180km garantissent une visibilité permanente d'un nombre suffisant de satellites en tout point du globe. Le principe de fonctionnement des GPS actuels repose sur la mesure du temps de vol de signaux émis par des satellites équipés d'horloges atomiques. La connaissance de la distance du récepteur à chacun de ces satellites permet d'en calculer la position par triangulation. Trois satellites sont donc nécessaires pour déterminer la position du récepteur en trois dimensions. Un quatrième satellite est nécessaire pour tenir compte de la non synchronisation de l'horloge du récepteur et des horloges des satellites.

Initialement, le GPS était exclusivement destiné aux activités militaires et c'est pourquoi, jusqu'en mai 2000, les récepteurs civils étaient soumis à une dégradation volontaire de performances. Pour des raisons de sécurité militaire, la position des satellites en orbite n'était diffusée aux utilisateurs civils qu'avec une précision de 100 mètres. Cette dégradation volontaire a été supprimée par le gouvernement américain, afin d'améliorer la compétitivité du système GPS face aux prochaines constellations de satellites concurrents comme Galileo. L'incertitude du positionnement d'un GPS civil est ainsi passée de 100 mètres à environ 10 mètres [1], [68].

2.2.3.2. Description du système

Le GPS comprend 3 composantes principales :

- La composante spatiale : constituée de 24 satellites en orbite autour de la terre. Les 24 satellites NAVSTAR²³ sont répartis sur 6 plans orbitaux dont l'inclinaison est de 55° par rapport à l'équateur terrestre et décalées en longitude de 60°. Sur chaque orbite naviguent 4 satellites (cf. Figure 2-4). La période de révolution de chaque satellite est la moitié de celle de la terre. Le GPS comporte actuellement 27 satellites opérationnels et en nécessite 24 pour être pleinement opérationnel. Chaque année environ 3 satellites nouveaux sont lancés pour conserver ce niveau de disponibilité. Les satellites GPS transmettent leurs données sur deux fréquences L1 à 1575.42MHz et L2 à 1227.6MHz, ceci de manière à éliminer l'erreur introduite par la réfraction ionosphérique. Ces fréquences sont générées grâce à l'horloge atomique embarquée à bord de chaque satellite. Les porteuses ne peuvent être utilisées directement pour le positionnement et c'est pourquoi deux codes binaires sont modulés sur les porteuses : le code C/A (*Coarse Acquisition*) et le code P (*Precise*). Il est également nécessaire de connaître les coordonnées du satellite. Cette information est envoyée par le satellite avec le message de données modulé sur les porteuses.
- La composante de contrôle : elle est constituée de 5 stations réparties à travers le monde et calculant l'orbite des satellites, contrôlant leur bon fonctionnement ainsi que la qualité de l'horloge embarqué dans chaque satellite. Ces stations sont situées sur les îles d'Ascension (océan Atlantique), de Diego Garcia (océan Indien), de Kwajalein et de Hawaii (océan Pacifique) ainsi qu'à Colorado Springs (station principale). Elles vérifient l'état des satellites lors de leur passage au dessus d'elles. Ces stations transmettent ensuite leurs données à la station principale. C'est là que les paramètres décrivant l'orbite des satellites et la qualité des horloges embarquées sont estimés, la vérification de la santé des satellites et la détermination d'un repositionnement éventuel sont également contrôlés. Grâce à la répartition uniforme des stations de contrôle, tous les satellites GPS sont captés à 92% du temps.
- La composante utilisateur : elle se compose de l'ensemble des récepteurs GPS, appareils permettant de calculer la position, la vitesse et l'heure d'un observateur, partout et à tout moment sur terre et dans ses environs, quelles que soient les conditions climatiques. On retrouve dans cette composante tous les utilisateurs, aussi bien civils que militaires.

²³ NAVSTAR : NAVigation System by Timing and Ranging

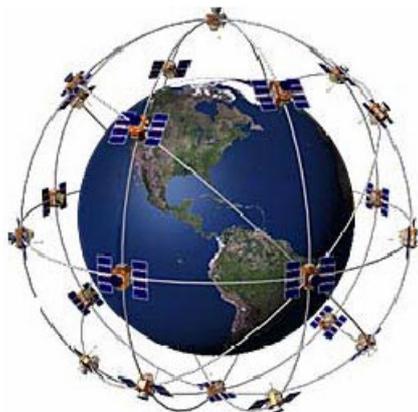


Figure 2-4 : Constellation des 24 satellites du système GPS

2.2.3.3. Le système d'augmentation par satellite SBAS

Le SBAS²⁴ est un système de satellites géostationnaires qui peut être utilisé dans le but d'améliorer la précision, l'intégrité et la disponibilité des signaux de base du GPS. Il inclut le système WAAS²⁵ en Amérique du nord, EGNOS²⁶ le système géostationnaire Européen, le système MSAS²⁷ japonais et enfin le système SNAS²⁸ chinois [1].

EGNOS est donc le dispositif d'augmentation européen des systèmes satellitaires américain GPS et russe GLONASS²⁹. Il est, tout comme le GPS, constitué des segments spatial, de contrôle et utilisateur.

2.2.4. Les bases de données cartographiques

Les bases de données cartographiques constituent une composante principale d'un système de navigation automobile. Ces cartes routières digitales constituent une représentation vectorielle et numérique du réseau routier. Dans cette représentation, les routes sont classiquement modélisées en 2D par une succession de points correspondant au centre de la chaussée (cf. Figure 2-5). Les points extrémités d'une voie ou d'intersections entre deux voies (jonctions sur la figure) constitués des nœuds (représentés par des carrés sur la figure) et représentent l'élément de base de cette modélisation. Afin de modéliser plus finement le tracé routier, des points intermédiaires sont également utilisés (représentés par des ronds sur la figure). Plus ces derniers sont nombreux, meilleur est le niveau de représentation.

²⁴ SBAS : *Satellite Based Augmentation System*

²⁵ WAAS : *Wide Area Augmentation System*

²⁶ EGNOS : *European Geostationary Navigation Overlay System*

²⁷ MSAS : *Multifunctional Transport Satellite-based Augmentation System*

²⁸ SNAS : *Satellite Navigation Augmentation System*

²⁹ GLONASS : *GLobale Orbiting NAVigation Satellite System*

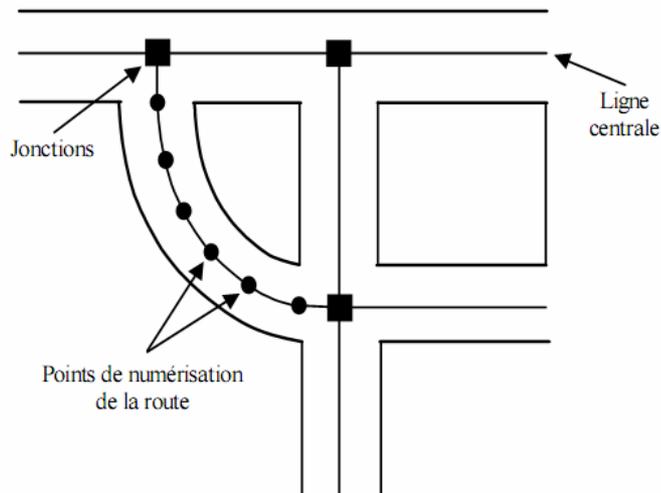


Figure 2-5 : Modélisation du tracé routier (Extraite de [16])

Les cartes routières numériques utilisées dans les systèmes de navigation actuels disposent d'une précision absolue³⁰ de représentation d'environ 10 mètres en zone urbaine et 25 mètres ailleurs [16]. Cette précision est pour l'heure en adéquation avec l'objectif premier pour lequel ces cartes sont utilisées, à savoir le guidage. En outre, elles contiennent des informations destinées essentiellement à la navigation, par exemple :

- Types et classes de routes ;
- Restrictions des routes ;
- Sens de circulation ;
- Noms des rues ;
- Points d'intérêts : stations de service, hôtels, restaurants, etc.

Pour les systèmes d'assistance à la conduite (ADAS), d'autres types d'informations sont nécessaires, comme les panneaux de signalisation, le nombre de voies, les limitations de vitesse, la pente de la route, le rayon de courbure de la route, etc. Les constructeurs et équipementiers automobiles ainsi que les fournisseurs de cartographies ont cherché à définir les attributs nécessaires aux systèmes ADAS afin de les rajouter dans les cartographies de nouvelles générations. Ceci a notamment été fait dans le cadre du projet européen NextMap ayant pour objectif d'améliorer et d'enrichir le contenu des bases de données routières pour l'assistance à la conduite (cf. §2.2.5).

Actuellement, toutes les données utilisées dans les systèmes de navigation sont modélisées selon une seule norme GDF (*Geographic Data Files*). Les deux plus grands fabricants de cartographies, NAVTEQ et TeleAtlas utilisent leur propre format de binérisation et de compression pour le stockage de la cartographie sur CD-ROM, néanmoins toute la modélisation est faite selon cette norme [49].

2.2.4.1. Le format GDF

Le GDF est un format d'échange de données, établi par le Comité Européen de Normalisation (CEN), avec la collaboration de plusieurs constructeurs automobiles, équipementiers automobiles et fabricants de systèmes de navigation et de cartographies. Ce format a pour principal but de servir de norme commune pour l'échange de données cartographiques, sans dépendre des autres formats commerciaux et des différentes solutions logicielles retenues par les utilisateurs. Ce format définit également la manière avec laquelle les données doivent être décrites et acquises et comment les attributs doivent être renseignés. Les fichiers de données au format GDF sont des fichiers ASCII, lisibles au moyen de

³⁰ La précision absolue correspond à la différence entre les coordonnées numérisées d'un point et la position réelle de celui-ci dans le réseau routier.

tout éditeur de texte. Les données figurant dans ces fichiers sont classifiées suivant trois catalogues [68] :

- *Features catalogue* : classes d'objets considérés comme des éléments de la cartographie : routes, voies ferrées, voies fluviales, zones urbaines, etc.
- *Attributes catalogue* : attributs que l'on peut associer à ces « *features* » : largeur, longueur, nombre de voies, etc.
- *Relationships catalogue* : liens que l'on peut établir entre deux « *features* » : jonctions, appartenances, etc.

Le format GDF n'offre pas assez de possibilités pour la modélisation de toutes les voies d'une route. Une proposition d'extension à GDF a été faite dans le cadre du projet européen NextMap [34]. Ce projet a pour principaux objectifs de :

- Identifier les besoins dans le domaine des bases de données cartographiques pour les systèmes de transport intelligents et les systèmes avancés d'aide à la conduite ADAS ;
- Evaluer la faisabilité technique et économique de ces bases de données cartographique élargies contenant les attributs requis par les systèmes d'aide à la conduite évolués ;
- Formuler les besoins pour rendre ces bases de données cartographiques compatibles avec la norme GDF et évaluer les coûts financiers de cette mise aux normes.

2.2.4.2. Le format SDAL

Le format SDAL (*Shared Data Access Library*) a été créé par la société NAVTEQ. Ce format permet de prendre peu de place mémoire et permet d'accéder rapidement à l'information à partir d'un CD-ROM. Les données codées au format SDAL se distinguent suivant deux catégories : spatiales et non spatiales. Les données spatiales regroupent tous les objets de type segment (portions de routes), noeud (intersections ou représentation d'objets complexes tels que les ronds-points), ou point d'intérêt (POI : *Point Of Interest*). Certaines données sont codées de façon non spatiale, et au lieu d'être classées suivant une organisation de l'espace, elles se voient attribuer une indexation arbitraire. Les données concernées peuvent être des points d'intérêt, des jonctions, des codes postaux etc. Les données non spatiales figurent dans un index spécifique, permettant d'effectuer des recherches suivant d'autres critères que la localisation spatiale (exemple : recherche de l'ensemble des restaurants d'une région, par extraction des points d'intérêt correspondants) [68].

2.2.5. Apports de la navigation pour les systèmes ADAS

Pour l'heure, les dispositifs d'assistance déjà sur le marché sont limités soit à l'observation du comportement du véhicule lui-même (ABS, ESP...), soit à l'environnement proche de celui-ci (ACC). Ces aides ne sont pas en mesure de réagir face à une situation localisée au-delà de leur champ de perception local, i. e. aux abords du véhicule. Ces restrictions peuvent être surmontées en utilisant les systèmes de navigation comme capteur virtuel [66]. La localisation absolue d'un véhicule dans une base de données routière laisse envisager de nouvelles perspectives dans le domaine de la sécurité routière. Les systèmes de navigation embarqués disposent d'informations contextuelles concernant d'une part l'infrastructure et d'autre part les aménagements du réseau routier. Par conséquent, ils peuvent apporter de bons résultats en terme d'anticipation en fournissant des informations primordiales sur la constitution du réseau routier en amont du véhicule (nature de la route, rayon de virage, nombre de voies, ...). Pour les systèmes d'aide à la conduite, l'apport de la navigation semble évident et concerne en premier lieu l'identification du profil routier voire du trafic, la présence d'obstacles, etc. [71] en amont du véhicule afin de pouvoir mieux anticiper les événements à venir. De nombreuses applications orientées confort (le guidage par exemple), mais également orientées sécurité s'appuyant sur la navigation et en particulier sur la cartographie peuvent à présent être envisagées. Les premiers travaux exploitant la navigation concernent le contrôle longitudinal du véhicule. Dans ce cas, l'objectif est de fournir une aide à la régulation de vitesse du véhicule selon les caractéristiques de la situation de

conduite. On citera par exemple le projet français LAVIA (« Limiteur s'Adaptant à la Vitesse Autorisée ») dont le principe consiste à identifier la route empruntée par le véhicule afin de limiter sa vitesse à la vitesse réglementaire en vigueur pour cette voie, et ce en empêchant toute accélération lorsque la vitesse requise est atteinte.

L'efficacité d'aides à la conduite fondées sur les cartographies numériques est néanmoins limitée par le contenu actuel de ces dernières, essentiellement dédié aux activités de navigation. C'est pourquoi, plusieurs projets s'intéressent à la définition et l'évaluation du contenu des bases de données numériques destinées à des applications automobiles avancées. Le projet européen NextMap par exemple a synthétisé les attributs qu'il serait souhaitable d'ajouter aux bases de données cartographiques actuelles (cf. Tableau 2-1) ainsi que la *roadmap* des applications ADAS pouvant bénéficier de ces données cartographiques (cf. Tableau 2-2) [62]. Ce travail se poursuit actuellement au sein du projet européen PReVENT regroupant différents fabricants de cartographies numériques [40], [81].

Eléments de cartographie	Information route/voie (début et fin)	Régulation du trafic et signalisation
Ponts	Nombre de voies	Panneaux de Limitations de vitesse
Butées des ponts	Largeur de la route et des voies	Panneaux de Stop
Tunnels	Type de routes	Feux de signalisation
Infrastructures routières (routes, autoroutes, ...)	Restrictions d'accès (hauteur, poids, ...)	Différentes priorités (Cédez le passage, ...)
Obstacles adjacents (maisons, murs, arbres, ...)	Restrictions d'accès pour les voies (bus, ...)	Passages piétons et 2 roues
Places de parking	Bandes d'arrêt d'urgence	
Péages	Voies de présélection (tourne à droite, tourne à gauche)	
Intersections	Bretelles d'autoroute	
Passage à niveau	Bas-côté	

Tableau 2-1 : Attributs à ajouter aux bases de données cartographiques pour les applications ADAS

	2001	2004	2006	2008	2010	2012
Alerte sur la vitesse d'approche d'un virage	♦	♦				
Contrôle adaptif des phares		♦				
Amélioration de la vision		♦				
Assistant pour les limitations de vitesse		♦				
Optimisation de la consommation d'essence		♦				
Gestion du moteur		♦				
ACC pour les camions		♦	♦			
Régulateur adaptif de vitesse		♦	♦			
Contrôle de vitesse dans les virages			♦			
Assistance visuelle et sonore			♦			
Prévention de collisions			♦	♦		
Stop &Go				♦		
Avertissement pour les changements de voie					♦	
Assistant à la conservation de la trajectoire sur la bonne voie					♦	
Assistant au changement de voie					♦	
Evitement de collision						♦
Conduite autonome						♦

Tableau 2-2 : Roadmap des applications ADAS basées sur la navigation

2.2.6. Limitations des systèmes de navigation

2.2.6.1. Limitations liées au positionnement par GPS

La principale limitation du GPS se situe dans la disponibilité des données. En effet, la réception des signaux peut s'avérer sporadique dans certains milieux mal adaptés (en milieu urbain, forêt, tunnel, bâtiment, etc.) [23]. Une autre limitation est celle de la précision. En effet, les systèmes de navigation automobiles actuels s'appuient sur des moyens de localisation dont la précision générale est de 10 à 15 mètres selon les régions. Cette précision est tout à fait adaptée aux exigences de l'aide à la navigation, notamment lorsqu'il s'agit d'avertir le conducteur d'un changement de direction avant un carrefour [49]. Cette précision est la conséquence de plusieurs facteurs :

- Erreur due au bruit de mesure : les mesures de phases ou de pseudodistances sont réalisées par comparaison entre le signal venant du satellite et le signal généré par le récepteur. Le bruit de mesure est estimé à 1% de la longueur d'onde du signal sur lequel se fait la mesure : code C/A, code P ou Phase (L1 ou L2) [8],
- Erreur du segment spatial : erreur sur les paramètres orbitaux des satellites,
- Erreur sur l'horloge propre du satellite par rapport au temps GPS,
- Erreur de propagation : le signal GPS se propage depuis le satellite vers l'antenne du récepteur. En traversant l'atmosphère terrestre, il subit les influences des différentes couches. L'ionosphère³¹ retarde le signal en fonction de l'activité solaire et de la situation géographique.

³¹ L'ionosphère : couche de l'atmosphère qui s'étend de 50 à quelques centaines de kilomètres. C'est un milieu dispersif, ionisé par l'action des radiations solaires [8].

La troposphère³² influence la propagation du signal par l'intermédiaire de phénomènes de réfraction. Cette erreur est très sensible aux basses élévations du satellite,

- Erreur de multi-trajets : les signaux GPS sont réfléchis sur certains objets avant d'être détecté par l'antenne. Cela se produit lorsqu'il y a des surfaces de réflexion dans le voisinage de l'antenne GPS. Cet effet peut engendrer des erreurs de l'ordre de 15-20m,
- Erreur due à la précision de l'horloge du récepteur (l'horloge du récepteur sert à mesurer des différences de temps). Cette erreur est plus importante que celle induite par l'horloge du satellite.

L'hybridation du GPS avec des capteurs proprioceptifs est utilisée dans le but de résoudre ces problèmes pour des applications critiques. Le GPS est surtout utilisé dans cette hybridation pour recalculer les dérives des estimations issues des capteurs proprioceptifs.

2.2.6.2. Limitations liées à la cartographie

Le contenu actuel de la plupart des bases de données cartographiques ainsi que la qualité de la géométrie routière ne remplissent pas les spécifications des applications ADAS [19]. La précision de la cartographie des systèmes de navigation n'est pas formellement quantifiée. En effet, on ne dispose aujourd'hui que d'avis d'experts précisant que l'ordre de grandeur de l'erreur est la dizaine de mètres [66]. Les systèmes d'aide à la conduite s'appuyant sur des bases de données routières nécessiteront une précision bien plus élevée ainsi que l'ajout d'attributs supplémentaires (courbure, pente dévers...) dans les données stockées au sein des cartographies.

Un autre problème des bases de données cartographiques est qu'elles ne sont pas systématiquement à jour, eu égard à l'évolution du réseau routier. Le taux de mise à jour des données dépend du niveau de représentation des routes. Lors de réactualisation des informations cartographiques, on privilégie en premier lieu le réseau principal (autoroutes et grands axes). Les axes secondaires, qui constituent pourtant les situations dans lesquelles des aides à la conduite basées sur une cartographie pourraient apporter une réelle amélioration pour le conducteur, sont mis à jour sur des périodes pouvant s'échelonner sur plusieurs années. Pour pallier à ce problème, des stratégies de mise à jour dynamique sont à l'étude, notamment dans le projet ActMAP [35]. Les composants mis à jour devraient être intégrés et/ou attachés à la cartographie numérique embarquée dans le véhicule. Ainsi, l'utilisateur d'un navigateur embarqué pourra recevoir des mises à jour qui seraient acheminées par GPRS par exemple, et qui pourraient porter aussi bien sur la géométrie du réseau routier que sur les informations des attributs de la cartographie.

Un autre problème concerne la représentation des informations dans la cartographie où pour des raisons d'espace mémoire, la numérisation de la cartographie n'a pas concerné tous les détails de routes. Par exemple, les petits ronds-points sont modélisés par des nœuds et sont considérés comme des intersections. Les petits ponts et tunnels ne sont pas représentés et certaines bretelles d'accès sont volontairement omises. Ceci montre la représentation approximative de la géométrie routière dans les bases de données cartographiques, qui constitue une vue déformée et simplifiée de la réalité [7].

³² La troposphère : couche basse de l'atmosphère qui est située entre la surface terrestre et une altitude d'environ 8 km (aux pôles) à environ 17 km (à l'équateur). Le retard troposphérique est d'environ 2m si le satellite est au zénith et peut atteindre 30m pour une élévation de 5° [8].

2.3. L'éclairage AFS : état de l'art

2.3.1. Principes

2.3.1.1. Introduction

Si seul 25% du trafic routier se déroule la nuit, les accidents en conduite nocturne représentent 55% des accidents de la route [14]. Dans le but de réduire ces chiffres, plusieurs constructeurs et équipementiers automobiles ont participé au projet européen *Adaptive Front lighting System* (AFS). Ce projet avait pour objectif d'une part de définir de nouvelles fonctions d'éclairage basées sur une adaptation du faisceau à la situation de conduite. D'autre part, il doit aboutir en 2008 à un changement de réglementation de l'éclairage automobile permettant ainsi leur réalisation. L'impact de ces nouvelles fonctions d'éclairage sur la sécurité routière sont en cours d'évaluation notamment dans le cadre du projet européen CLARESCO (*Car and truck Lighting Analysis : Ratings and Evaluations for Safety and Comfort Objectives*) [70].

L'éclairage AFS permet de moduler le faisceau d'éclairage pour fournir au conducteur une dimension supplémentaire dans la perception visuelle de la situation de conduite. L'éclairage sera plus large en ville et plus profond sur autoroute. L'orientation des phares prendra en charge la courbure, la pente et le devers de la chaussée ainsi que les conditions météorologiques. En d'autres termes, l'éclairage de demain ne sera plus statique et ne suivra plus les ordres du conducteur mais sera dynamique et garantira un niveau de perception accrue.

Les différentes fonctions d'éclairage identifiées dans le projet AFS sont [14] :

- Motorway Light : augmentation de la distance d'éclairage en agissant à la fois sur la hauteur des projecteurs et la forme du faisceau.
- Adverse Weather Light : selon la réflectivité de la route et les conditions météorologiques, la forme du faisceau peut être améliorée par :
 - o une réduction de la puissance d'éclairage afin de diminuer les risques d'éblouissement suite à une réflexion sur une chaussée humide,
 - o un meilleur éclairage des accotements de la route.
- Town Light : élargissement du faisceau lumineux en situation urbaine afin d'améliorer l'éclairage latéral et diminuer l'éblouissement. Il permet notamment l'identification des piétons et des cyclistes aux intersections.
- Bending Light : éclairage dynamique suivant les changements de direction de la route (virages).

La Figure 2-6 illustre ces différentes stratégies d'éclairage selon les situations de conduite considérées.

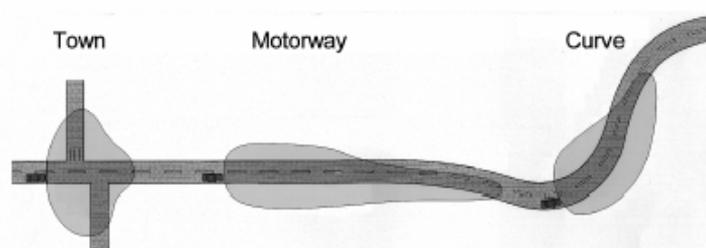


Figure 2-6: Formes du faisceau lumineux de l'éclairage AFS selon les situations de conduite (Extrait de [27])

2.3.1.2. Intérêts des systèmes AFS

Le caractère innovant de l'éclairage orientable de la Citroën DS n'a, à l'époque, pas suffi pour imposer cette avancée technologique. Pourtant, un système de ce type dispose de réels intérêts pour la

conduite automobile. Ainsi, les récents travaux concernant les dispositifs AFS ont pour principaux intérêts une augmentation sensible de la sécurité et du confort des automobilistes.

Sécurité

L'amélioration des conditions de vision a une influence directe sur la capacité du conducteur à détecter à temps, des situations potentiellement dangereuses. L'augmentation de la distance de vue donne au conducteur un laps de temps additionnel pouvant être utilisé pour un freinage ou pour des manœuvres d'évitement de dangers. Un freinage anticipatif diminue considérablement la fatalité de l'accident [27]. Dans le but d'évaluer l'impact sur la sécurité et le confort des systèmes d'éclairage AFS, Hamm et Rosenhahn [27] ont étudié ces systèmes dans différentes situations de conduite : autoroutes, routes de campagne, prise de virages et à l'approche d'intersections. Ils se sont en particulier intéressés à la mesure de la distance de détection d'objets, cette information permettant de renseigner sur le degré d'anticipation obtenu par les 3 stratégies d'éclairage testées (un éclairage conventionnel, un éclairage rotatif en fonction de l'angle au volant et finalement un éclairage rotatif en fonction d'informations vidéo permettant de prédire le profil routier en orientant l'éclairage selon le rayon de courbure de la route). La plus grande amélioration, en terme de distance de détection, est obtenue par le système prédictif (à partir d'informations vidéo), en particulier à l'entrée des virages (cf. Figure 2-7). En comparaison avec le système conventionnel, l'amélioration est d'environ 35% à l'entrée des virages et d'environ 29% en virages (cf. Figure 2-7). Dans un deuxième temps, ils ont également évalué les performances d'une fonction d'éclairage en autoroute (consistant à élever le faisceau selon la vitesse du véhicule). Il a ainsi été montré que la distance de détection est doublée (de 70 mètres à 148 mètres) en autoroute et presque triplée (de 13 mètres à 32 mètres) aux abords d'intersections (cf. Figure 2-8).

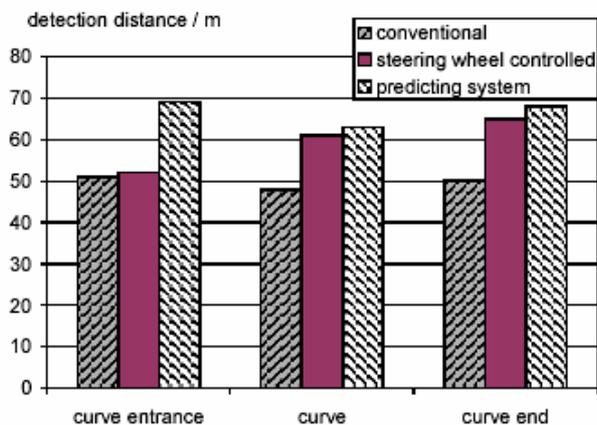


Figure 2-7 : Distance de détection des objets pour les différentes fonctions d'éclairage en courbe d'après [27]

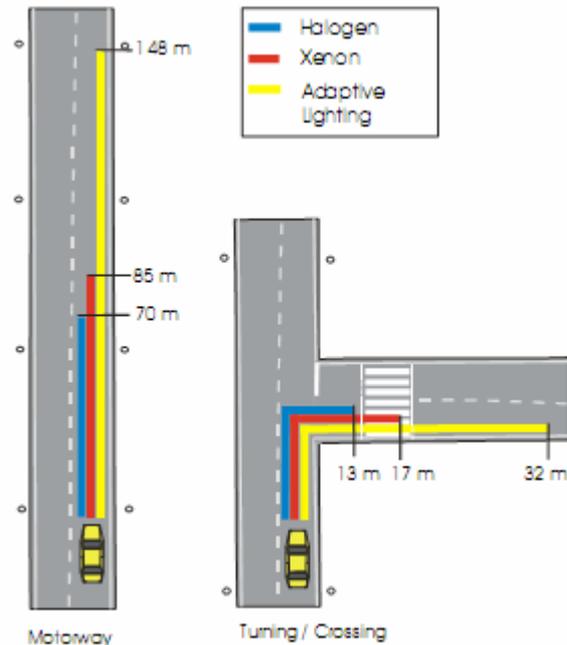


Figure 2-8 : Distance de détection des objets pour les fonctions d'éclairage en autoroute et intersection d'après [27] (*Halogen*=éclairage conventionnel, *Adaptive lighting*=éclairage prédictif)

Confort

Outre l'accroissement de la sécurité, un gain significatif du confort de conduite est également obtenu grâce à la technologie AFS. La Figure 2-9 présente les résultats d'une analyse subjective du confort d'éclairage entre un dispositif adaptatif et la technologie standard de lampes halogènes [27]. Cette analyse a été effectuée sur un ensemble de personnes composé à la fois d'experts et de non experts en éclairage automobile. Dans les diverses configurations testées (autoroutes, prise de virage, etc.), on constate que l'éclairage prédictif améliore significativement l'impression de sécurité et de confort des utilisateurs.

Les résultats de cette étude sur la sécurité et le confort apportée par l'éclairage prédictif montrent l'intérêt d'un tel éclairage dans l'amélioration de la perception visuelle du conducteur. Néanmoins, le capteur prédictif évalué dans cette étude est basé sur un dispositif vidéo ayant une portée limitée. L'utilisation de la navigation permettrait d'une part de disposer d'une portée de perception plus grande, et d'autre part de bénéficier d'informations sur la route susceptible d'être emprunté par le véhicule (rayon de courbure, nombre de voies de circulations, etc.). Ces éléments permettraient ainsi d'améliorer davantage la perception visuelle du conducteur notamment lors de changement de courbure de la route, situation à l'origine de nombreux accidents. Il convient de préciser qu'en phase établie de prise de virage, la différence entre un système prédictif et un système basé sur l'action du conducteur au volant tend à diminuer (cf. Figure 2-7).

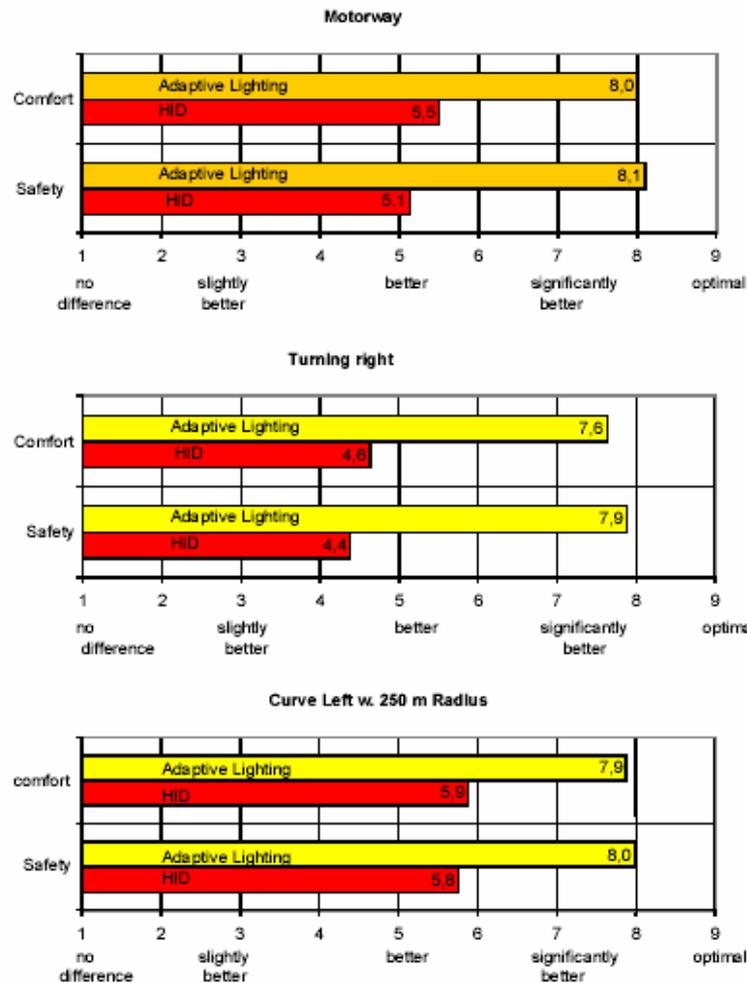


Figure 2-9 : Evaluation subjective de l'éclairage AFS d'après [27]

2.3.2. Les projets AFS

Nous présentons dans cette section quelques contributions récentes ayant pour objectif l'amélioration de l'éclairage AFS. La majorité des travaux relatifs à l'AFS porte sur l'éclairage rotatif en virages. Dans ce secteur, des études ont été menées en vue de définir le type d'éclairage optimal (rotation symétrique/asymétrique des optiques), de prendre en compte le comportement du conducteur dans l'élaboration des lois de commande ou encore d'évaluer le degré d'éblouissement de ces nouvelles solutions.

2.3.2.1. Travaux récents en technologie AFS

Analyse des situations de conduite

Strambersky *et al.* ont mené une étude dans le but d'améliorer la visibilité, le confort et la sécurité du conducteur en virages et intersections [77]. Ce travail se base sur l'utilisation de phares orientables (dynamiques) et de phares statiques additionnels pour l'éclairage latéral.

L'éclairage orientable en virage tient compte de l'angle au volant, de la hauteur des projecteurs et du rayon de courbure de la route. Le rayon de courbure R est calculé à partir de l'empattement a (empattement du véhicule) et l'angle γ représentant la direction des roues avant (cf. Figure 2-10) :

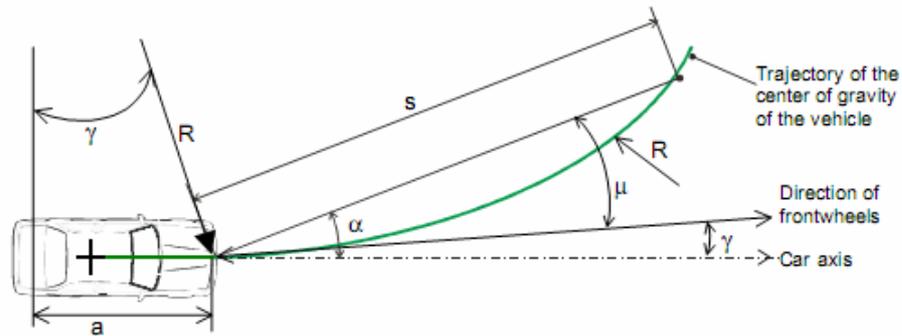


Figure 2-10 : Calcul de l'angle de pivotement selon Ackermann (Extraite de [77])

L'angle de pivotement des projecteurs α est obtenu en utilisant la règle d'Ackermann :

$$\alpha = \arcsin(100 \times h/2R) + \arcsin(a/R) \quad \text{Équation 2-1}$$

où h représente la hauteur de montage des projecteurs sur le véhicule.

Dans cette étude, trois situations de conduite ont été considérées : trajet urbain, routes de première classe (reliant les grandes agglomérations) et routes de deuxième classe (qui relient les petites agglomérations).

Le Tableau 2-3 présente les fréquences de rotation en fonction des situations de conduite considérées. Durant ces essais, en zones urbaines, le conducteur circule durant 16% du temps sur des portions de routes courbes de moins de 70m de rayon de courbure (intersections rectangulaires et ronds-points), où l'intérêt de l'AFS est réel. Enfin, en situation extra-urbaine, la plage de pivotement de ± 10 degrés couvre la majorité des situations rencontrées.

	Lignes droites	1-5°	5-10°	10-15°	15-20°	20-30°	30° et plus
Rayon (m)	850 et plus	850-400	400-200	200-130	130-100	100-70	70 et moins
Zone urbaine	22%	31%	14%	8%	5%	4%	16%
Routes départementales	40%	28%	14%	7%	4%	3%	4%
Routes nationales	49%	30%	15%	5%	1%	0%	0%

Tableau 2-3 : fréquences des angles de pivotement sur différentes routes d'après [77]

Améliorations du DBL (Dynamic Bending Light)

Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude de l'éclairage dynamique en courbe et à la détermination des stratégies de commande appropriées. Nous nous limiterons ici à la présentation de trois contributions.

Dubrovin *et al.* [14] se sont intéressés à évaluer en simulation deux stratégies d'éclairage en virages. La première est basée sur les informations du véhicule telles que la vitesse et l'angle au volant. Elle permet d'ajuster l'orientation des faisceaux dans les situations de virage, selon les commandes du conducteur. La seconde approche utilise les données de la navigation pour déterminer à l'avance la

géométrie de la route. Les deux stratégies ont été comparées en temps-réel sur un simulateur de conduite de RENAULT spécialement dédié à la simulation d'éclairage. Les essais réalisés avaient pour objectif la validation, en simulation, des stratégies développées avant le passage aux essais dans des conditions réelles sur véhicule. Les résultats ont montré que l'éclairage piloté par la navigation permet au conducteur de mieux apprécier les courbures de la route, comparativement à l'utilisation d'un éclairage conventionnel.

Yamamoto a étudié différentes solutions de commande d'éclairage *AFS Bending Light* en fonction de l'angle au volant [83]. L'étude avait pour objectif d'améliorer le pivotement des phares et d'assurer un éclairage sûr et non éblouissant pendant le pivotement. Plusieurs stratégies d'éclairage en courbe ont été évaluées : pivotement d'un seul phare, pivotement symétrique et asymétrique des deux phares (cf. Figure 2-11). L'efficacité de ces stratégies a été quantifiée par l'évaluation du niveau d'illumination d'un point de fixation défini comme étant le point sur lequel arrive le véhicule après 3 secondes de parcours.

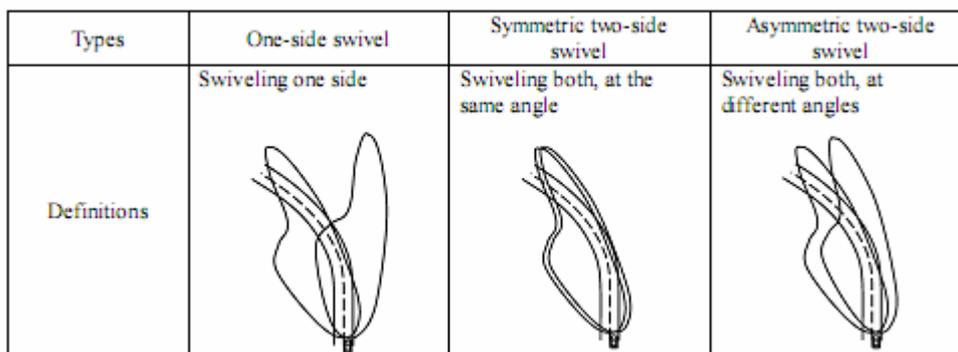


Figure 2-11 : Stratégies de pivotement selon Yamamoto [83].

La simulation a permis de conclure que, dans ce contexte, le pivotement asymétrique des deux phares constitue la meilleure méthode pour l'amélioration de l'éclairage en courbes. La Figure 2-12 montre les niveaux d'amélioration atteints pour chacune des méthodes ainsi évaluées. L'éblouissement relatif à ces différentes stratégies a également été quantifié (cf. Figure 2-13) et il a été montré que la valeur maximale d'éblouissement, quelque peu supérieure à celle d'un éclairage conventionnel fixe, reste néanmoins inférieure au seuil de 2 lux fixé par la réglementation européenne.

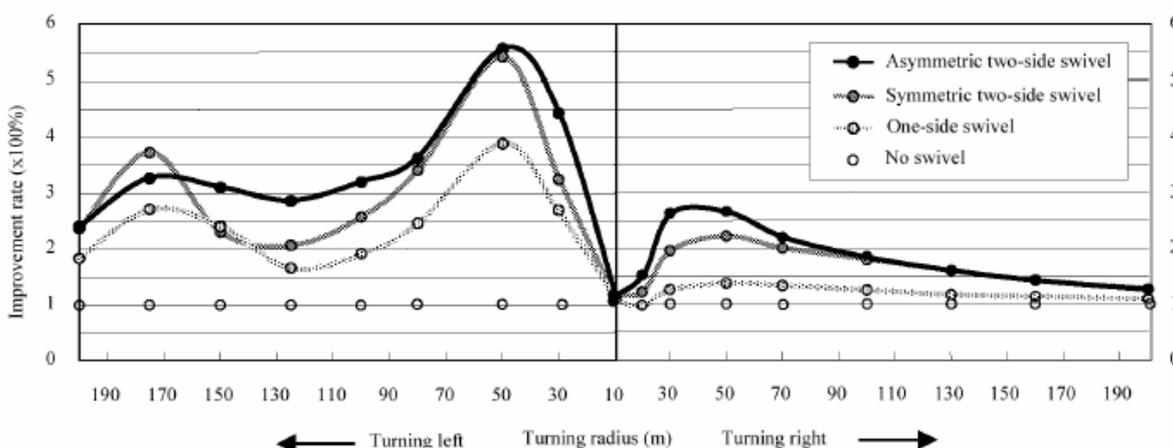


Figure 2-12 : Taux d'amélioration de l'illumination du point de fixation en fonction des rayons de courbure d'après [83] (volant à gauche)

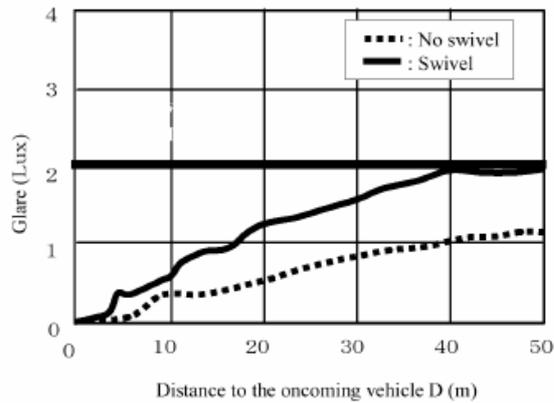


Figure 2-13 : Valeurs d'éblouissement des véhicules venant en sens inverse d'après [83]

Tout comme Yamamoto, Sivak *et al.* ont évalué les avantages et inconvénients de plusieurs stratégies d'éclairage (symétrique, asymétrique...) en courbe [75]. Deux rayons de courbure (80 et 240m) ont été examinés pour des virages à droite et à gauche. Finalement, les auteurs concluent que, pour des virages à petits rayons de courbure à droite ou à gauche, les différentes stratégies examinées ont tendance à fournir un meilleur éclairage que la stratégie conventionnelle d'éclairage statique. Par ailleurs, les auteurs concluent que les écarts entre les différentes stratégies sont minimales. La meilleure stratégie, en terme de portée³³ est le pivotement symétrique des deux optiques, ce qui se vérifie aussi dans des grandes courbes à droite, alors qu'à gauche, la meilleure stratégie est la stratégie nominale (projecteurs conventionnels d'éclairage statique).

Si les travaux de Sivak et de Yamamoto aboutissent à des résultats quelque peu différents, notamment en ce qui concerne la stratégie d'éclairage à employer (symétrique, asymétrique), il convient de noter que dans les plages de fonctionnement communes évaluées par les deux auteurs (R=80m), les deux stratégies de contrôle sont sensiblement équivalentes (cf. Figure 2-12).

2.3.2.2. Prise en compte du conducteur pour l'amélioration des fonctions AFS

Intérêts de la prise en compte du conducteur

Une des principales considérations dans le développement de l'éclairage AFS concerne la détermination de la zone à éclairer selon les situations de conduite considérées. Pour la conception de l'éclairage AFS, il est nécessaire d'utiliser des informations du véhicule, telles que sa vitesse et l'angle au volant afin de connaître l'état du véhicule. La prise en compte de paramètres caractérisant le conducteur (direction du regard, type de conduite...) permettrait d'individualiser quelque peu la technologie AFS. Ainsi l'étude du comportement visuel du conducteur peut par exemple mener à l'identification de la zone vers laquelle l'éclairage doit être orienté [84]. D'une manière générale, l'analyse du comportement du conducteur selon les différentes situations de conduite peut aboutir à la définition d'un éclairage de la scène de conduite optimal et en adéquation avec son profil de conduite.

Stratégies AFS en fonction du comportement visuel du conducteur

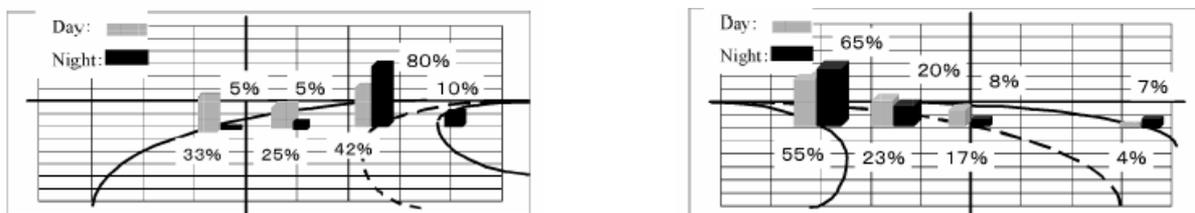
Des études ont d'ores et déjà été menées dans le but d'améliorer l'éclairage AFS en fonction du comportement visuel du conducteur. Parmi ces travaux, on trouve en particulier ceux de Young *et al.* [84] qui a étudié le comportement visuel de 20 conducteurs dans des situations de conduite précises (intersections et virages). Ces travaux s'appuient sur la mesure simultanée d'indicateurs comportementaux du conducteur (rotation de la tête, etc.) et des actions qu'il entreprend (vitesse du véhicule, angle au volant, etc.). Ces analyses ont conclu qu'en intersections et pour des virages de

³³ La portée a été définie comme étant la distance maximale pour laquelle l'éclairage atteint 3 lux.

faible rayon (40m), la rotation maximale de la tête des conducteurs en conduite nocturne est inférieure à celle observée en conduite diurne. Pour des virages de 90m de rayon de courbure, aucune différence significative n'a pu être notée. Si ces travaux ont initié les recherches sur l'étude du comportement visuel pour l'amélioration de l'éclairage AFS, aucune loi de commande d'éclairage n'a été implémentée à partir des résultats présentés.

De leur côté, Ishiguro et Yamada [44] ont effectué des essais ayant pour objectif, d'une part de définir la distribution des points de fixation du conducteur dans les virages en conduite diurne et nocturne, et d'autre part de déterminer la relation entre la vitesse du véhicule et le point de regard. Cette dernière et a par la suite été utilisée pour la conception d'une logique de contrôle AFS.

La Figure 2-14 présente les distributions du regard relevées dans des courbes à droite et à gauche. Durant ces essais, la conduite s'effectuait à gauche. Pour les virages à droite, en conduite diurne, le regard est réparti entre l'accotement extérieur, la voie de circulation du véhicule et la ligne médiane. On note par ailleurs une augmentation de la fréquence de fixation de la ligne médiane en conduite nocturne (80%). Pour les courbes à gauche, la fréquence d'observation de l'accotement intérieur est maximale. En conclusion, le conducteur se focalise principalement sur une zone qu'il va chercher à tangenter avec son véhicule.



(a) Distribution du regard dans un virage à droite (b) Distribution du regard dans un virage à gauche

Figure 2-14 : Distribution du regard en courbe d'après [44] (conduite à gauche)

Les résultats des distances de regard en fonction de la vitesse du véhicule sont présentés sur la Figure 2-15. Pour évaluer la distance d'observation, les auteurs ont déterminé, pour 3 vitesses de circulation données, les fréquences de fixation de points en amont du véhicule (*Accumulated freq.* sur la Figure 2-15).

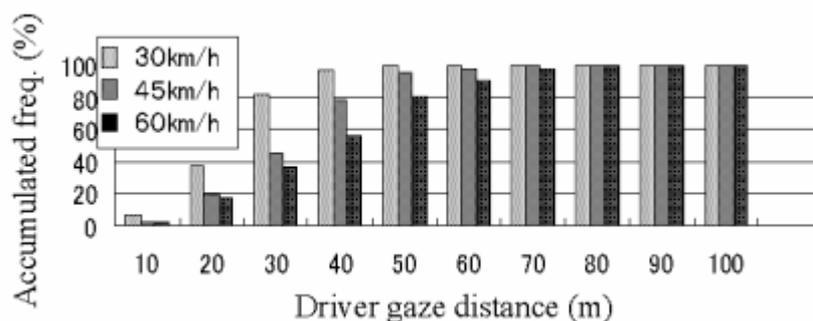


Figure 2-15 : Distance du regard en conduite diurne en virage d'après [44]

Les résultats montrent que la distance d'observation évolue avec l'accroissement de la vitesse. A partir de ces résultats, les auteurs ont proposé une loi de commande d'éclairage AFS en courbe (*Bending Light*). Il s'agit d'une commande symétrique dont le principe consiste à augmenter l'angle de pivotement des phares suivant la vitesse du véhicule selon l'équation suivante :

$$\omega = \left(180^\circ / \pi\right) \left(v_t / 2R\right) \quad \text{Équation 2-2}$$

où ω représente l'angle de pivotement, V la vitesse du véhicule, R le rayon de courbure du virage (cf. Figure 2-16).

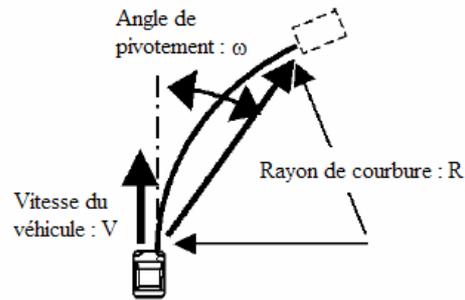


Figure 2-16 : Angle de pivotement correspondant à V et R d'après [44]

Le paramètre t définissant le degré d'anticipation recherché, a été pris égal à 3 secondes, valeur suffisante pour envisager une éventuelle manœuvre d'évitement [44], [83].

La loi de commande développée ci-dessus est uniquement basée sur l'information de vitesse du véhicule. Elle ne tient pas malheureusement pas compte des mesures effectuées sur les points de fixation du conducteur. En outre, l'information de courbure de la route est estimée à partir des paramètres du véhicule (l'empattement, la vitesse du véhicule, l'angle des roues avant du véhicule et le facteur de stabilité³⁴). Aussi, le caractère anticipatif et préventif de cette solution demeure limité.

Nous présentons dans la section suivante une approche complémentaire à celle-ci exploitant les informations d'un SIG pour fournir au conducteur un éclairage s'adaptant aux situations de conduite (virages, rond-points) et à leurs contextes (conduite urbaine, extra urbaine, etc.).

2.4. Le projet NAFS

2.4.1. Concept et objectifs

2.4.1.1. Concept du projet NAFS

Le projet NAFS *Navigation-based Advanced Front lighting System* s'inscrit dans la continuité d'un projet de conception d'assistance du conducteur mené au laboratoire MIPS et dénommé NAICC (*Navigation Aided Intelligent Cruise Control*). Le but est d'améliorer la sécurité des occupants d'un véhicule routier mais également des autres usagers de la route (piétons, etc.) tout en améliorant les qualités de confort des véhicules. NAFS a été initié dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire MIPS et Valeo. Cette collaboration a débuté par un projet de DEA [10], cette thèse en constituant la suite directe.

NAFS vise à améliorer la perception nocturne par la conception de nouvelles stratégies de commande d'éclairage s'appuyant sur les outils des sciences et technologies de l'information et de la communication et en particulier les techniques de fusion de données.

La définition précise de la situation de conduite nécessite l'emploi de plusieurs sources d'information de natures différentes. Il convient alors d'exploiter au maximum les signaux de ces sources pour effectuer un diagnostic précis et fiable de l'environnement d'évolution du véhicule. Techniquement, NAFS consiste à exploiter principalement les informations fournies par un dispositif de navigation permettant de connaître la situation du véhicule ainsi que le contexte routier (grâce à l'emploi de bases

³⁴ facteur de résistance au renversement du véhicule, calculé à partir de la largeur de voie du véhicule et de la hauteur de son centre de gravité.

de données géographiques) dans lequel il se trouve. L'analyse de ces informations aboutie à la définition d'une/des loi(s) de commande d'éclairage en adéquation avec la situation de conduite.

Finalement, l'ensemble de ces travaux pourrait se résumer par la volonté de fournir au conducteur une dimension supplémentaire dans la perception visuelle, lui permettant de mieux voir et être vu.

2.4.1.2. Objectifs du projet NAFS

Des systèmes visant à améliorer la visibilité, la sécurité et le confort du conducteur dans des situations de conduite nocturne précises (virages et intersections), équipent déjà quelques véhicules. Ainsi, on trouve d'une part, les phares orientables dynamiques (Citroën C5, BMW...) et d'autre part, les phares statiques additionnels pour l'éclairage latéral (Renault Modus). Ces phares tiennent principalement compte de l'angle au volant et permettent donc d'associer l'orientation de l'éclairage à la direction que prend le véhicule. Cette première génération d'éclairage actif ne permet néanmoins pas d'anticiper et/ou annoncer un changement du profil routier. C'est pourquoi, certains travaux s'intéressent à la conception de fonctions d'éclairage disposant de facultés anticipatives facilitant la détection d'éventuels obstacles. L'utilisation des systèmes de navigation permettrait d'optimiser cet éclairage en fonction de la géométrie de la route, de la situation de conduite (ligne droite, intersections...) et de son contexte (conduite urbaine, extra-urbaine...). Enfin l'aspect anticipatif³⁵ de cette aide garantie au conducteur une meilleure analyse de son environnement de conduite.

Le projet NAFS dans lequel s'inscrivent ces travaux a pour objectifs généraux :

- D'optimiser l'éclairage des véhicules en intégrant des fonctions de contrôle de leur orientation suivant la localisation du véhicule et en adaptant la forme du faisceau suivant l'environnement proche du véhicule [10].
- D'associer les informations disponibles via les systèmes de navigation afin d'optimiser les lois de contrôle des systèmes d'éclairage.
- D'évaluer la faisabilité de l'utilisation des systèmes de navigation afin de savoir jusqu'à quel point ces outils et les réseaux GPS actuels et futurs peuvent répondre à ces attentes de manière efficace et fiable. En effet, il convient de prendre en compte les limites induites par la précision même du GPS et/ou de la cartographie, par les signaux (bruit de mesure, signaux aberrants...) ou encore par la qualité des informations relevées (informations fausses ou incomplètes...).
- D'explorer l'utilisation d'autres capteurs venant confirmer/infirmier le diagnostic effectué par la navigation. Ceci s'explique par le fait que la complexification des fonctions d'éclairage en vue d'un confort et d'une sécurité améliorés pousse fortement à l'emploi de techniques de fusion de données élaborées. Au-delà de la synergie entre navigation et capteurs de base du véhicule, l'étude a pour but d'explorer l'utilisation d'autres capteurs tels les cameras, qu'ils soient partie prenante d'autres dispositifs d'assistance (régulateur de vitesse intelligent...) ou dédiés à l'éclairage. Ainsi, la fusion de données, appliquée ici à la prise de décision, permet de définir les situations et les contextes de conduite de l'environnement d'évolution du véhicule (autoroute, ville, etc.) et de choisir la loi appropriée parmi les différentes lois de commande d'éclairage développées pour répondre aux fonctionnalités recherchées (code autoroute, code ville, code virage). Cette démarche doit permettre de choisir en temps-réel, et par anticipation, entre ces différentes lois de commande. Elle permet, par conséquent, l'amélioration de la robustesse du système d'éclairage.
- De généraliser cette approche afin de pouvoir être étendue à d'autres applications d'aide à la conduite (les systèmes ADAS: *Advanced Driver Assistance Systems*).

La Figure 2-17 illustre les fonctions d'éclairage AFS recherchées dans le cadre du projet NAFS. Cette figure montre une importante amélioration de l'éclairage automobile dans différentes situations de conduite. Tout d'abord, en utilisant les informations de la navigation, l'éclairage pourra être modulaire

³⁵ Contrairement à un éclairage qui suit les actions du conducteur donc qui résulte de l'analyse de la situation.

en fonction de la situation de conduite : déformation des codes en ville afin de privilégier un éclairage moins lointain et plus large (éclairage permettant de voir les piétons et les cyclistes) ou plus profond et étroit sur autoroute. Par ailleurs, l'utilisation de capteurs renseignant sur les conditions météorologiques permettrait de minimiser les reflets sur route mouillée, les risques d'éblouissement étant alors diminués en raison de la nécessité de sécuriser l'éclairage.

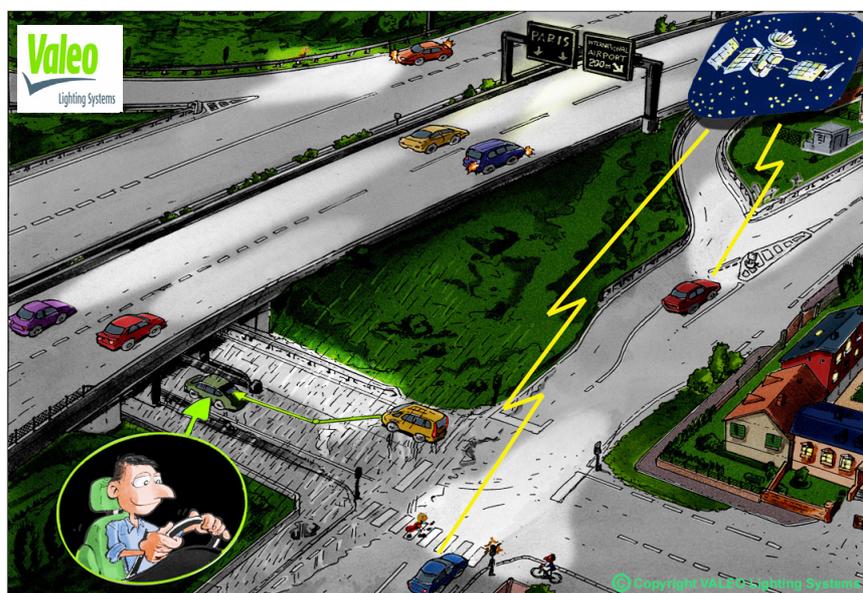


Figure 2-17 : Objectifs du projet NAFS

Le travail présenté dans cette thèse constitue une première étape vers les stratégies d'éclairage définies sur la Figure 2-17 et exploite principalement un dispositif de navigation pour l'optimisation des lois d'éclairage.

2.4.2. Structure de l'assistance NAFS

L'assistance proposée dans ces travaux consiste à exploiter les informations géographiques contenues dans une base de données cartographiques numérique en vue de l'optimisation de fonctions d'éclairage AFS. Le principe du système d'assistance NAFS est basé sur le couplage d'un système de navigation avec des projecteurs AFS comportant les fonctions d'éclairage TL³⁶, ML³⁷, FBL³⁸ et DBL³⁹. La Figure 2-18 présente la structure de cette assistance. Un module d'extraction des données utiles aux lois de commande d'éclairage a été développé et intégré au système de navigation utilisé. Ce module de détermination des situations et des contextes de conduite intègre l'extraction des informations géographiques de la cartographie ainsi qu'un automate d'états finis destiné à la gestion des situations de conduite et la sélection des lois de commande appropriées. Le Système d'Information Géographique⁴⁰ ouvert ADASRP (*Advanced Driver Assistance Systems Research Platform*) utilisé dans ces travaux est spécialement conçu pour faciliter l'accès aux données cartographiques en vue du développement d'applications d'assistance à la conduite [59].

A partir de la localisation du véhicule obtenue par le système de navigation, l'extraction d'un horizon électronique est effectuée. L'horizon électronique représente une image des chemins envisageables en amont du véhicule et associe aux segments et aux points de la cartographie des informations décrivant

³⁶ TL : *Twon Lighting* (élargissement du faisceaux lumineux en zones urbaines).

³⁷ ML : *Motorway Lighting* (augmentation de la portée d'éclairage en autoroute).

³⁸ FBL : *Fixed Bending Light* (éclairage latéral statique dans les courbes. Exemple : Renault Modus).

³⁹ DBL : *Dynamic Bending Light* (éclairage directionnel dans les virages).

⁴⁰ Un SIG permet l'interrogation, l'extraction ainsi que l'affichage d'informations contenues dans des bases de données cartographiques numérisées.

l'environnement du véhicule (nombre de voies de circulation, les limitations de vitesse associées aux segments, des indications sur les ouvrages d'art, etc).

Après l'extraction de l'horizon électronique, une détermination des situations de conduite est faite sur la base d'une analyse événementielle de cet horizon (cf. §4.2).

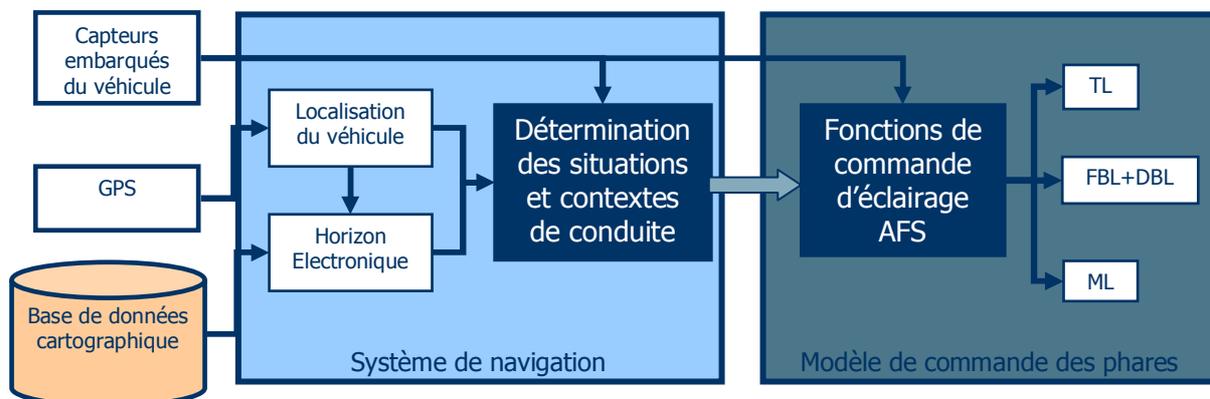


Figure 2-18 : Structure de l'assistance NAFS

2.4.3. Identification des situations de conduite et des stratégies d'éclairage

Dans le but d'optimiser les lois de commande d'éclairage AFS, une définition des stratégies d'éclairage assisté par la navigation a été réalisée. Cette synthèse a consisté dans un premier temps en une identification des situations et des contextes de conduite dans lesquels l'on souhaite accroître le degré de perception du conducteur par l'élaboration de fonctions d'éclairage optimisées. Dans un deuxième temps, les fonctions d'éclairage à appliquer selon ces situations et contextes de conduite ont été identifiées. Cette étude a été faite en collaboration avec des experts de l'éclairage de Valeo.

Dans cette section, nous présentons tout d'abord les situations de conduite dans lesquelles l'on souhaite fournir une assistance au conducteur avant de définir et développer les fonctions d'éclairage AFS associées.

2.4.3.1. Situations et contextes de conduite considérés

Dans la suite de ce travail, il a été choisi de caractériser l'environnement d'évolution du véhicule selon 2 niveaux : un niveau global représenté par le contexte de conduite et un niveau local défini par la situation de conduite. Le contexte de conduite définit l'environnement général du véhicule. On distingue dans ce travail 4 contextes différents : le contexte autoroutier, les contextes urbain et extra-urbain et enfin un ensemble dénommé Autres discriminant tous les autres contextes envisageables.

Par ailleurs, en parallèle du contexte, il est nécessaire pour disposer d'un éclairage optimal, de caractériser précisément la situation de conduite du véhicule à un instant donné. Les situations considérées dans le projet NAFS sont au nombre de 4 : les virages, les intersections et finalement les ronds-points et enfin un ensemble dénommé Autres discriminant tous les autres contextes envisageables⁴¹.

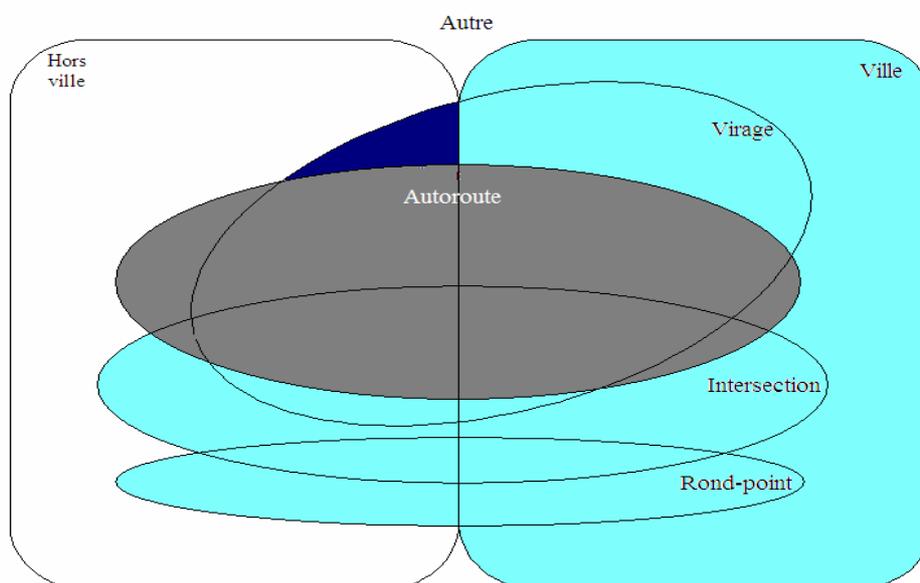
Le domaine contextes-situations ainsi obtenu ne permet bien entendu pas d'identifier tous les cas de figure rencontrés lors de la conduite automobile. Néanmoins, cette approche discrimine la majorité des situations dans lesquelles une aide basée sur un éclairage adaptatif peut s'avérer bénéfique pour le conducteur.

⁴¹ Rapport technique confidentiel de Valeo.

2.4.3.2. Identification des stratégies d'éclairage considérées

La représentation graphique présentée sur la Figure 2-19 a été effectuée afin de faciliter d'une part la mise en œuvre de la commande d'éclairage AFS basé sur le capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel (cf. §4.2) et d'autre part la mise en œuvre des stratégies d'éclairage. Cette vue tient compte des spécificités et particularités de représentation dans le système de navigation des situations et contextes de conduite préalablement identifiées. Cette illustration en 3 dimensions (contextes, situations de conduite et fonctions d'éclairage désirées) discrimine aisément l'espace des solutions et réduit avantageusement les cas à traiter. Ainsi, les lois de commande à considérer en fonction des situations et contextes de conduite sont :

- sur autoroute : ML+FBL+DBL et ce quelque soit les informations de contexte additionnelles (ville ou hors ville).
- en ville : TL+FBL+DBL et ce quelque soit la situation de conduite
- en hors ville :
 - « intersection » et « rond – point » : TL+FBL+DBL.
 - « virage » : FBL+DBL.



Légende

	Mode normale	Hors ville, autre
	TL + FBL + DBL	Ville, Intersection en ville, Intersection hors ville, Viragè en ville, Intersection et Viragè en ville, Rond-point et Intersection en ville, Rond-point et Intersection hors ville, Rond-point en ville et hors ville, Intersection et virage hors ville
	ML + FBL + DBL	Autoroute et Viragè en ville et hors ville, Autoroute et Viragè et Intersection en ville et hors ville, Autoroute et Intersection en ville et hors ville, Autoroute en ville et hors ville
	FBL + DBL	Viragè hors ville

Figure 2-19 : Situations de conduite, contextes et stratégies d'éclairage associées

2.4.4. Identification des stratégies d'éclairage

Le tableau ci-dessous synthétise finalement les stratégies d'éclairage précédemment identifiées en fonction des situations et contextes de conduite prédéfinis.

	Autoroute		Ville			Hors ville			Voies rapides
	Int	Virages	Int	Rdpt	Virages	Int	Rdpt	Virages	
ML	■	■							■
TL			■	■	■	■	■		
FBL	■	■	■	■	■	■	■	■	■
DBL	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Légende									
Int : Intersection									
Rdpt : Rondpoint									

Tableau 2-4 : Stratégies d'éclairage

2.5. La sûreté de fonctionnement : aspect sécuritaire de NAFS

La sûreté de fonctionnement représente un aspect primordial pour toutes les activités en relation avec la sécurité dite "des personnes et des biens". Elle consiste à garantir l'innocuité du système vis-à-vis de son environnement, tant en fonctionnement normal qu'en cas de défaillance. Elle implique la maîtrise de la fiabilité du système au sens de son immunité face aux menaces liées à son environnement. La sûreté de fonctionnement d'un système peut être définie comme étant la propriété qui permet à ses utilisateurs de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre. L'utilisateur peut être un individu tel que l'opérateur ou le superviseur, ou un autre système matériel/logiciel ayant des interactions avec le système considéré. Selon les applications auxquelles le système est destiné, la sûreté de fonctionnement peut être vue selon des propriétés différentes mais complémentaires : fiabilité, disponibilité, sécurité, maintenabilité, confidentialité-intégrité [41].

Dans cette optique, pour le système NAFS décrit dans ce manuscrit, une étude complète de sûreté de fonctionnement a été effectuée avec la collaboration d'un expert de Valeo. La sûreté de fonctionnement est primordiale pour une application d'assistance dont l'objectif est de fiabiliser la conduite nocturne. Par ailleurs, elle revêt un intérêt particulièrement important puisque l'on touche aux fonctions d'éclairage et que cela peut s'avérer particulièrement néfaste si cela est mal maîtrisé (éclairage inapproprié, éblouissement...).

Cette étude présentée en annexe de ce manuscrit et menée dans le cadre de cette thèse a considéré plusieurs aspects :

- Analyse fonctionnelle du système NAFS ;
- Analyse préliminaire des risques ;
- Découpage fonctionnel ;
- Arbres de défaillances des événements redoutés.

2.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le contexte et de décrire le cadre dans lequel s'inscrivent les travaux qui seront développés dans ce mémoire. Dans le but de réduire le nombre d'accidents et d'améliorer la sécurité du conducteur, plusieurs systèmes d'assistance passive et active ont été développés. Les systèmes d'assistance active nécessitent une anticipation sur la perception de l'environnement dans lequel évolue le véhicule. Cette anticipation est utile afin de réagir à temps face aux éventuels dangers. Ainsi, l'utilisation de capteurs anticipatifs et prédictifs est essentielle. Les systèmes de navigation à base de cartographies routières numériques équipant de plus en plus les véhicules, peuvent être utilisés comme des capteurs virtuels anticipatifs. L'intérêt des capteurs virtuels réside dans le fait de pouvoir disposer d'une variable non mesurable par les capteurs existants. Dans cette optique, le projet NAFS mené dans cette thèse consiste en une assistance à la conduite nocturne utilisant la navigation en vue

d'optimiser les fonctions d'éclairage automobile. L'objectif principal de cette démarche est l'amélioration de la sécurité du conducteur et la réduction du nombre d'accidents survenant lors de la conduite nocturne.

3. Chapitre 3 : Nécessité de capteurs virtuels pour l'aide à la conduite

3.1. Introduction

Dans le cadre du projet NAFS, nous avons besoin des données en anticipation pour la prédiction de la trajectoire future du véhicule. Ceci est dans le but de pouvoir commander en anticipation les phares selon la géométrie de la route en amont du véhicule. L'anticipation est primordiale pour l'amélioration de l'éclairage et des fonctions d'aide à la conduite en général. Ceci permet d'éviter des dangers potentiels en amont du véhicule. Pour ce faire, le concept de capteur virtuel a été retenu. Ceci permet de reconstruire une mesure qu'on ne peut pas obtenir directement par un capteur. Dans ce qui suit, nous allons présenter la notion de capteur virtuel et les principes de la fusion de données. Dans le cadre du projet NAFS, ces deux notions sont primordiales. Deux capteurs virtuels ont été développés dans le cadre de cette thèse. Ces capteurs virtuels ont pour objectif l'optimisation de l'éclairage AFS en assurant une commande anticipative selon la géométrie de la route. Ce chapitre présente les notions des capteurs virtuels et les concepts généraux ainsi que les 3 formalismes de fusion de données (théories des probabilités, des possibilités et de la croyance). Ces deux mécanismes utilisés dans le développement de ces deux capteurs virtuels ont été retenus pour assurer la fiabilité de l'assistance qui ne peut être obtenue qu'en utilisant plusieurs capteurs. Ils permettent d'extraire une décision robuste par rapport à la variabilité de l'environnement d'évolution du véhicule.

3.2. Capteurs virtuels et fusion de données

3.2.1. Notion de capteur virtuel

Le terme moderne de « capteur virtuel » s'emploie le plus souvent pour faire référence à l'approche automatique d'observation d'états. Capteur virtuel et « observateur » s'emploient donc souvent de façon interchangeable [139] et se réfèrent au mécanisme utilisé pour reconstruire des mesures manquantes ou difficilement obtenues à partir des données disponibles [106]. Le capteur virtuel est basé sur l'idée d'extraire, à partir des informations disponibles, les informations des paramètres qui ne sont pas mesurables directement ou nécessitant des capteurs très coûteux [25]. Il exploite le plus souvent les théories de l'observation et de l'estimation d'états, de la modélisation et de l'identification expérimentale. A la différence d'un observateur, un capteur virtuel suppose moins de connaissance sur le processus physique. L'observateur est souvent basé sur des principes physiques et il est plus transparent⁴² que le capteur virtuel. Les capteurs virtuels sont souvent des boîtes noires (réseaux de neurones par exemple) et sont particulièrement de valeur quand la physique sous-jacente du système est trop complexe ou incertaine et que l'on dispose de suffisamment de données pour développer/faire apprendre un capteur virtuel. Un capteur virtuel d'une mesure quelconque peut utiliser les signaux des autres capteurs disponibles et un modèle approprié pour créer un signal estimant cette mesure recherchée. La précision d'un capteur virtuel dépend naturellement de la précision des paramètres du modèle et de la précision des signaux des autres capteurs utilisés. Le choix des capteurs à utiliser doit

⁴² La transparence fait référence au modèle du processus sur lequel l'observateur s'appuie. Un modèle de connaissance sera de type boîte blanche alors qu'un modèle de représentation est dit de type boîte noire.

se faire avec précaution car la présence de signaux non pertinents peut compliquer la conception du capteur virtuel [139].

En terme d'applications, les capteurs virtuels sont des composantes fondamentales dans un éventail de systèmes technologiques incluant le contrôle, les communications, le biomédical, les radars et les systèmes environnementaux [106]. Parmi les applications de ce type de capteurs dans le domaine de l'automobile, on trouve par exemple celles de Prokhorov qui a conçu trois capteurs virtuels pour la détection du raté d'allumage, pour l'estimation du couple moteur et pour la détection de changement de pression des pneus [139]. La méthode utilisée est basée sur un réseau de neurones récurrent. Cette méthode a pour principal intérêt de ne pas nécessiter de connaissance du modèle du système.

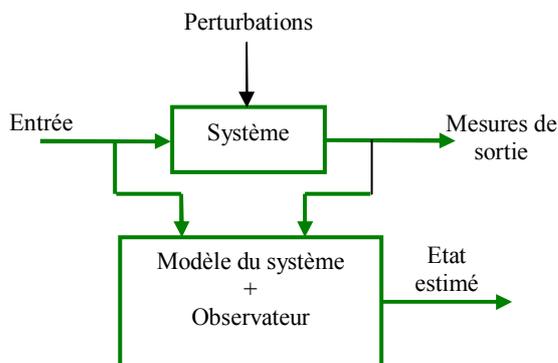


Figure 3-1 : Structure d'un capteur virtuel (Extrait de [152])

Stéphane *et al.* ont utilisé des capteurs virtuels pour estimer la dérive et les forces latérales d'un véhicule automobile. Quatre types d'observateurs ont ainsi été comparés [152]. Dans cette approche une connaissance précise du système est nécessaire pour permettre l'élaboration d'un capteur virtuel se basant sur un modèle dudit système (cf. Figure 3-1).

Enfin, Gustafsson a conçu des capteurs virtuels pour la mesure précise de la vitesse de lacet, de la vitesse absolue, de la pression des pneus et de leurs adhérences [24], [25]. Cette méthode, basée sur un filtrage de Kalman adaptatif, utilise également un modèle du véhicule.

3.2.2. Capteurs virtuels pour l'assistance à la conduite

Les capteurs virtuels ont pour principal objectif de reconstruire une variable non mesurable ou qui nécessite l'utilisation de capteurs très coûteux pour la mesurer. Dans le cadre du développement des systèmes d'aide à la conduite, des capteurs de bas coûts sont généralement utilisés pour pouvoir rendre la fonctionnalité accessible aux conducteurs souhaitant l'avoir à un prix abordable. Par exemple, les systèmes de contrôle actif du châssis sont actuellement limités à un nombre restreint de véhicules du fait de leur coût encore élevé. Afin de rendre ce type de systèmes disponibles pour tous types de véhicules, les constructeurs automobiles s'efforcent de réduire leur coût sans pour autant en sacrifier les performances. Un moyen permettant d'accomplir cet objectif est de réduire le nombre de capteurs dans le système et d'estimer les variables précédemment mesurées [112].

Dans cette optique, plusieurs travaux de développement des systèmes d'aide à la conduite se sont orientés vers cette notion de capteur virtuel pour reconstruire des variables non mesurables mais nécessaires pour le fonctionnement de ces systèmes d'aide.

Les cartographies routières et plus généralement les SIG utilisés initialement pour la navigation, peuvent être considérées comme des capteurs virtuels. En effet, ils sont utilisés en ce sens du fait de leur capacité, sur la base d'informations provenant de capteurs embarqués « faible coût », à donner une vision prédictive de l'environnement global du véhicule et de la géométrie de la route en amont de celui-ci. Plusieurs applications d'aide à la conduite se sont basées sur ce capteur virtuel. Il a notamment été utilisé par Polychronopoulos *et al.* pour le développement d'un système d'aide à la conduite destiné au maintien du véhicule dans la voie (*Lane Keeping Support*) dans un schéma de fusion avec les informations d'une caméra [64]. Bien d'autres applications d'aide à la conduite

peuvent tirer parti des capteurs virtuels permettant ainsi de fiabiliser et sécuriser l'activité de conduite. On citera entre autres exemples le système d'avertissement de virages (*Curve Warning System*) qui utilise les informations d'un capteur virtuel exploitant un SIG pour détecter les virages et définir une vitesse appropriée.

3.2.3. Contexte de la fusion de données

Les capteurs virtuels ont pour objectif d'effectuer une estimation ou une reconstruction d'une variable ou d'un état du système qui ne peut être mesuré directement. Cette approche est généralement basée sur l'utilisation d'autres grandeurs mesurables au travers de capteurs. Du fait de la nature généralement imparfaite (imprécision, incertitude, incomplétude, etc.) de ces mesures, la fusion de données s'avère être une bonne solution pour le développement de capteurs virtuels fiables. La fusion de données multi-sources constitue par conséquent le cadre formel de l'assistance à la conduite mise en œuvre dans ces travaux portant sur le développement de capteurs virtuels pour l'aide à la perception. En exploitant les données de plusieurs capteurs dans un schéma de fusion de données, le taux de fausses alarmes des systèmes d'aide au conducteur peut être réduit et la fiabilité ainsi améliorée. La redondance et la complémentarité des sources sont à l'origine de cette amélioration. La redondance est exploitée dans le système de fusion pour réduire les incertitudes et les imprécisions. Quant à la complémentarité, elle est exploitée pour avoir une information globale plus complète et pour lever les ambiguïtés [89]. L'idée derrière l'exploitation de plusieurs capteurs ou sources est donc d'exploiter au mieux les avantages de ces sources et de pallier aux problèmes de chacune des sources prise indépendamment. Ainsi, dans la suite de ce chapitre, nous nous attacherons à présenter le contexte de fusion de données sur lequel s'appuient les capteurs virtuels d'aide à la perception développés dans ces travaux.

3.3. Principes généraux de la fusion de données

3.3.1. Introduction

La fusion d'informations est apparue afin de gérer des quantités importantes de données multi-sources. Les premières applications employant les concepts de la fusion de données ont été développées dans le domaine militaire. Le terme de fusion de données a été introduit aux Etats-Unis dans les années 70 mais les techniques de fusion ont réellement connu un large développement à partir des années 80 [98]. L'objectif est classiquement d'améliorer la performance d'un dispositif et/ou d'augmenter la fiabilité d'une information en combinant des informations redondantes et complémentaires. Les données à fusionner peuvent être nombreuses et issues de sources hétérogènes (capteurs, bases de données, expertises) [128]. La complémentarité et la redondance de ces dernières sont directement à l'origine des performances du processus de fusion.

De nombreuses définitions de la fusion de données ont été déclinées dans la littérature. Le plus souvent, la fusion est considérée comme un processus de traitement de l'information agissant sur plusieurs sources afin d'en extraire une information d'une richesse accrue. Ainsi, Bloch considère que *"La fusion d'informations consiste à combiner des informations issues de plusieurs sources afin d'améliorer la prise de décision"* [89]. Des définitions très proches de celle précédemment citée ont également été données, notamment par Grandin [107] ou encore Hall [113] :

- *"La fusion de données consiste essentiellement à confronter et intégrer des informations multiples dans le but de réduire l'incertitude sur l'information résultante"*.
- *"La fusion de données multi-capteurs cherche à combiner les données de plusieurs capteurs pour réaliser des inférences qui ne peuvent pas être possibles à partir d'un capteur unique. La fusion de données est analogue au processus cognitif continu employé par les humains pour intégrer des données continuellement à travers ses sens pour faire des inférences du monde externe"*.

On citera pour finir Klein dont la définition, plus technique, mais également plus complète, fait apparaître le fait que le processus de fusion peut d'une part se traiter à différents niveaux, et d'autre part considérer plusieurs objectifs (de la détection à la combinaison des données) [118] :

– “*La fusion de données est un processus multi-niveaux et multi-facettes traitant de la détection automatique, de l'association, de la corrélation, de l'évaluation, et de la combinaison des données et des informations provenant de sources uniques ou multiples afin d'aboutir à des estimées affinées des positions et des identités, à une évaluation complète et en temps utile des situations et des menaces, et de leur importances*”.

Les domaines d'application de la fusion de données sont de plus en plus nombreux et concernent principalement les applications médicales, spatiales et satellitaires, et militaires [1]. Dans ce dernier domaine, la fusion de données sert très souvent à l'identification automatique de cibles, l'analyse de situations de champs de bataille, et l'évaluation de menaces. Des applications industrielles incluant la commande des machines complexes (par exemple des centrales électriques nucléaires) ou encore la fabrication automatisée emploient également les concepts de la fusion de données [113].

3.3.2. Modèle fonctionnel et niveaux de fusion

Un modèle fonctionnel décrivant la fusion de données a été défini par le DFG (*Data Fusion Group*) du JDL (*Joint Directors of Laboratories*) au début des années 1990. Initialement développé pour fournir une vision de la fusion de données ainsi qu'une architecture facilitant la communication entre la communauté scientifique, les industriels et les utilisateurs, ce modèle a été récemment complété. Ainsi, aux quatre niveaux initialement définis, Steinberg *et al.* ont ajouté un cinquième niveau, dénommé niveau 0 (cf. Figure 3-2) [151].

Les différents niveaux de fusion de ce modèle sont les suivants :

- Le niveau 0 – Evaluation des données bas niveau : estimation et prédiction des états des signaux/objets observables à partir de l'association et de la caractérisation des données de bas niveau (pixel/signal).
- Le niveau 1 – Evaluation de l'objet : estimation et prédiction des états d'une entité à partir de son suivi, de l'estimation continue et discrète de son état.
- Le niveau 2 – Evaluation de la situation : estimation et prédiction des relations entre les entités (influences perceptuelles et de communication, contexte physique, etc.).
- Le niveau 3 – Evaluation d'impact : estimation et prédiction des effets sur les situations des actions planifiées, estimées ou prédites des participants.
- Le niveau 4 – Affinement du processus (élément de gestion des ressources) : adaptation des processus d'acquisition et de traitement des données pour atteindre les objectifs de la mission. Il contrôle la globalité du procédé de fusion. Il peut agir sur tous les organes, depuis le jeu de capteurs jusqu'aux lois de commande du système, et ce en respectant les critères de fonctionnement établis au départ.

Chaque niveau supérieur du procédé de fusion de données traite l'information à un niveau supérieur d'abstraction. Les niveaux 0 et 1 utilisent principalement des méthodes numériques et statistiques, alors que les niveaux 2, 3 et 4 utilisent principalement des méthodes symboliques issues de l'intelligence artificielle [107].

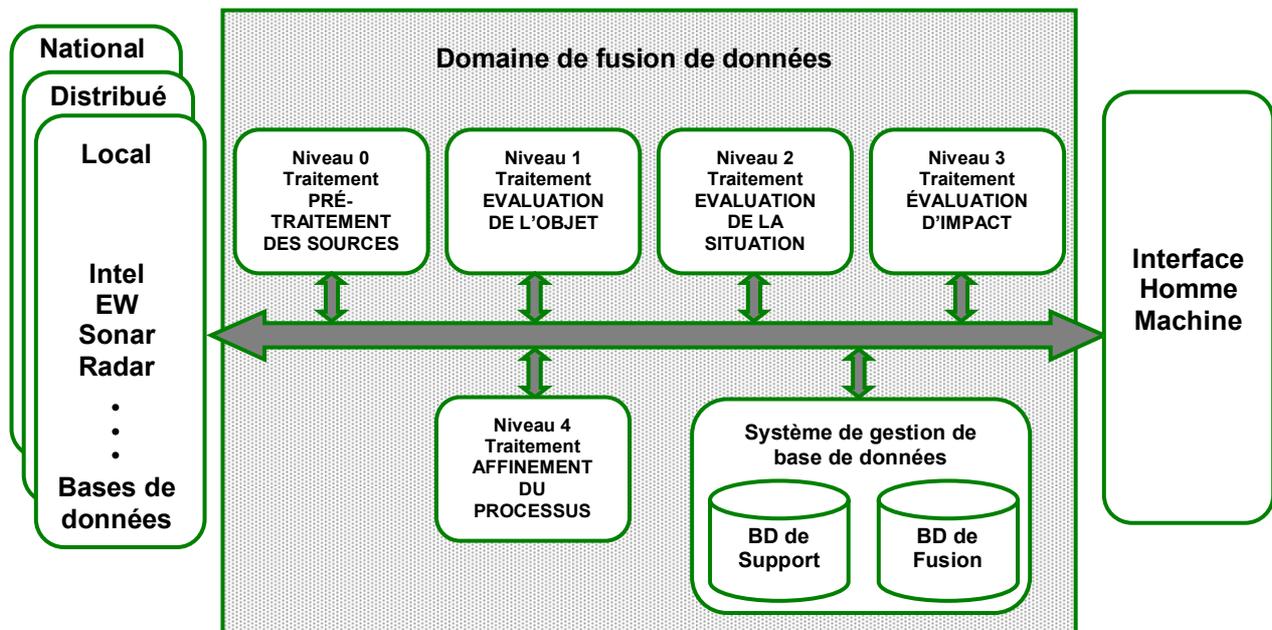


Figure 3-2 : Modèle de fusion de données du *Joint Directors of Laboratories* selon [118]

En pratique, ce modèle n'est pas approprié pour décrire le concept de fusion de données. Néanmoins, cette modélisation hiérarchique permet et a permis le développement de nombreuses applications de fusion.

3.3.3. Architectures de fusion

Le paragraphe précédent a introduit le formalisme utilisé afin de spécifier les différents niveaux fonctionnels d'intervention de la fusion de données. Cependant, cette formalisation ne tient pas compte des solutions technologiques utilisées lors de la réalisation d'un système réel : il est donc nécessaire de s'intéresser aux architectures des procédés de fusion.

Il existe plusieurs classifications des architectures de fusion de données.. La démarche présentée dans cette section s'appuie sur une classification des architectures de fusion se rapportant au modèle fonctionnel du JDL et s'appuyant sur la structure du processus de fusion [128]. Les architectures décrites ci-dessous se rapportent toutes au niveau 1 du modèle fonctionnel. Ces architectures sont :

- L'**architecture centralisée** (cf. Figure 3-3) où l'on concentre l'information vers un unique centre de décision et de contrôle. Chaque capteur peut fournir au processeur de fusion des données avec un minimum de traitement. Les algorithmes de fusion centralisés sont généralement plus complexes et doivent traiter les données à des taux d'échantillonnage plus élevés que lors d'une fusion décentralisée (cf. ci-dessous). Ils nécessitent de grosses ressources en termes de calcul ainsi qu'un bus suffisamment robuste pour assurer le transport de données sans pertes. De plus, en cas de panne du calculateur central, tout le processus de fusion est stoppé;

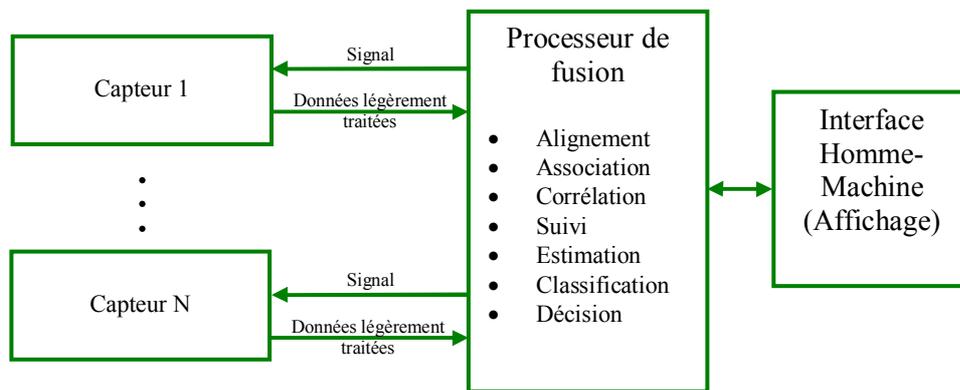


Figure 3-3 : Architecture de fusion centralisée selon [118]

- L'**architecture distribuée ou décentralisée** (cf. Figure 3-4) où il existe plusieurs centres de fusion coordonnés. Chaque capteur détecte, classe, identifie et estime les pistes des cibles potentielles avant de fournir le résultat de ce traitement au processeur de fusion principal. Ce dernier combine l'ensemble de ces données pour améliorer la classification, l'identification ou l'estimation d'état de l'objet d'intérêt. Les objectifs de la décentralisation sont la robustesse en cas de dysfonctionnement du centre de fusion, la capacité à étendre le système par simple insertion des nouveaux éléments, approche dite *plug and play*. Cette approche permet de réduire considérablement le délai pour munir le système de fusion de nouveaux capteurs et de nouveaux procédés [107]. Par ailleurs, elle permet de spécifier des algorithmes de fusion propres à chaque source. Néanmoins, elle demeure délicate à mettre en oeuvre notamment du fait de la création et de la propagation dans le réseau d'informations redondantes qui biaisent les décisions des nœuds de fusion. C'est pourquoi, la structure la plus fréquente est une approche intermédiaire à la fusion centralisée et décentralisée dite hiérarchique ou hybride (cf. ci-dessous) ;

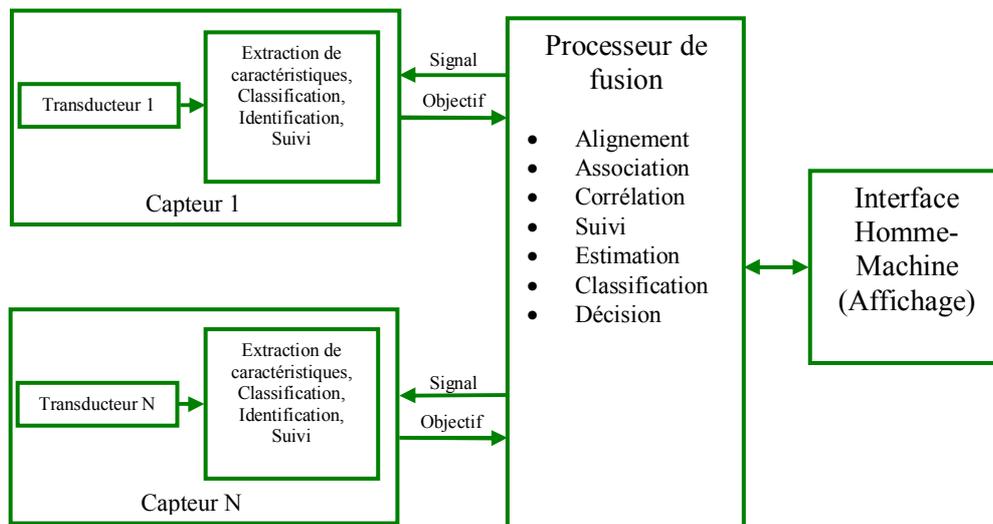


Figure 3-4 : Architecture de fusion décentralisée selon [118]

- L'**architecture hiérarchique ou hybride** (cf. Figure 3-5) fait cohabiter dans un système de fusion à la fois des fonctions centralisées et distribuées [107]. Le processeur de fusion centralisée peut disposer à la fois des données prétraitées des capteurs, et des données issues d'une étape de fusion décentralisée. Cette architecture tend à limiter les défauts inhérents aux architectures centralisées et distribuées, tout en conservant leurs qualités, à savoir la robustesse du processus face aux pannes et la précision de la fusion finale. Le nombre et la complexité des traitements ainsi que le volume de données échangées constituent les principaux inconvénients de la fusion hybride.

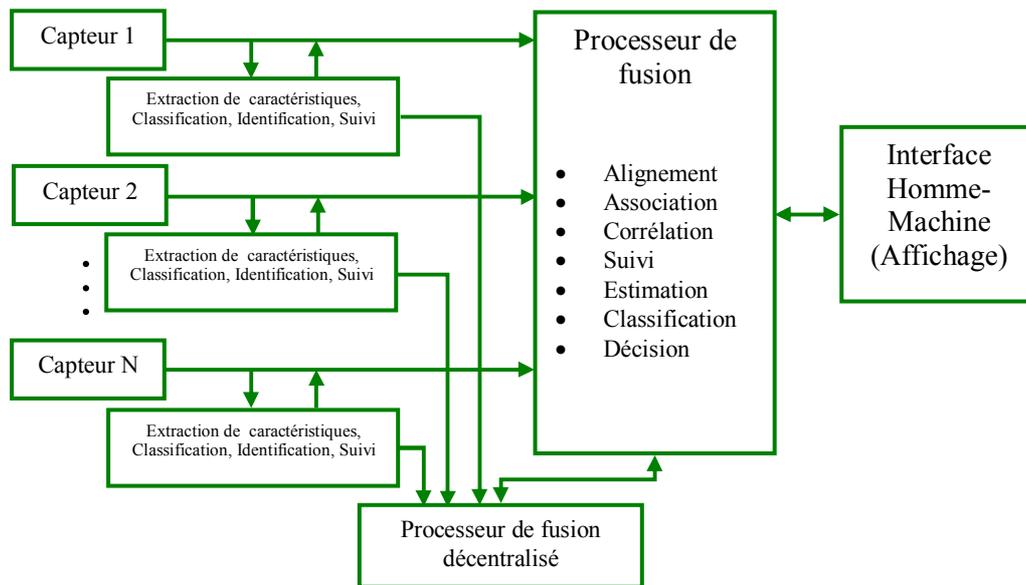


Figure 3-5 : Architecture de fusion hybride selon [118]

Dans les différentes architectures présentées ci-dessus, le processeur de fusion peut assurer plusieurs fonctions parmi lesquelles on trouve [118] :

- l'alignement : consiste à ramener les informations dans un référentiel spatial et temporel commun où elles peuvent être comparées. La normalisation des données est réalisée.
- l'association : consiste à affecter l'observation d'un capteur ou d'une source à un objet souvent appelée piste.
- la corrélation : combinaison des pistes et des données de mesure issues de l'association pour améliorer la détection, la classification, et le suivi des objets d'intérêt.
- l'estimation : recalage de la valeur ou de l'ensemble des valeurs de l'état compte tenu de l'acquisition.
- la classification : association d'un signal à un objet. .
- le signal : rétroaction (*feedback*) de seuil, de temps d'intégration, et d'autres paramètres ou informations de traitement des signaux concernant les régions sur lesquelles mener une recherche plus détaillée, en se basant sur les résultats du processus de fusion.

3.3.4. Etapes de fusion de données

Dans [128], Martin propose un modèle présentant de manière synthétique l'opération de fusion de données (cf. Figure 3-6). Ce modèle établit que le processus de fusion s'appuie sur les informations issues des capteurs (sources) ainsi que sur des informations supplémentaires relatives aux sources (leur dépendance, fiabilité...) et des connaissances externes. Les connaissances externes au système ont pour objectif de permettre le choix d'une modélisation appropriée à la problématique de fusion. La fusion aboutit au final à un résultat auquel s'ajoute éventuellement un indice de qualité jugeant des performances de la fusion.

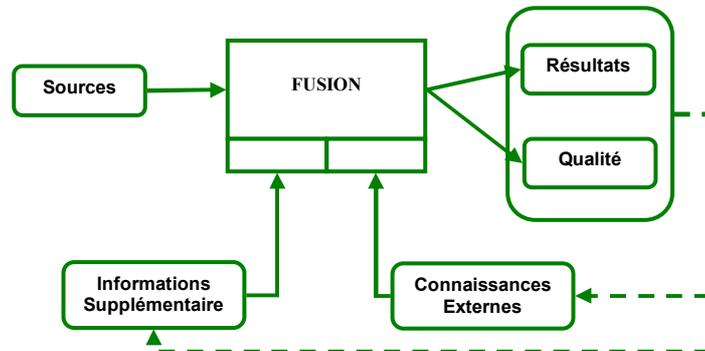


Figure 3-6 : Représentation de la fusion selon [128]

Les principales étapes constituant le processus de fusion sont les suivantes [89], [128] :

1. Modélisation : choix du formalisme et des expressions des informations à fusionner dans ce formalisme. Elle repose essentiellement sur les connaissances de l'expert et est donc particulièrement importante. La modélisation peut être guidée par les informations supplémentaires relatives au domaine ou à l'application considérée et dont dispose l'expert ;
2. Estimation : étape dépendante de la modélisation, elle n'est pas systématique mais souvent nécessaire pour la plupart des formalismes. Des informations supplémentaires peuvent aussi intervenir à ce niveau ;
3. Combinaison : l'étape de combinaison est la phase de regroupement des informations. C'est le cœur de la fusion. Elle concerne le choix d'un opérateur, compatible avec le formalisme de modélisation retenu. Des informations supplémentaires peuvent également guider ce choix ;
4. Décision : ultime étape de la fusion. Elle permet de passer des informations fournies par les sources à la prise d'une décision.

3.3.5. Contraintes liées aux applications

Lors du développement d'applications exploitant les théories de la fusion de données et les formalismes qui seront présentés par la suite, la prise en compte de certains nombres de contraintes liées à cette démarche est primordiale. Un processus de fusion devra être robuste par rapport à 3 types de contraintes différents :

- L'imperfection des informations,
- La gestion d'un processus multi-sources,
- L'aspect temporel (synchrone, asynchrone) lié aux grandeurs à fusionner.

3.3.5.1. Contraintes sur l'imperfection des informations

En fusion, une des caractéristiques importantes de l'information est son imperfection [89]. Les approches de fusion d'informations reposent en effet sur la modélisation des imperfections de l'information afin d'intégrer cet élément le plus fidèlement possible dans l'étape de fusion.

Les principales imperfections considérées en fusion de données sont l'imprécision et l'incertitude. Si la première est généralement bien maîtrisée, la seconde ne se réfère pas au contenu de l'information mais à sa qualité [123]. A ces deux imperfections peuvent s'ajouter l'incomplétude, la redondance, la complémentarité, le conflit, et l'ambiguïté [128]. On donne ici les définitions de ces imperfections [89], [128], [57], [143] :

- *Incertain* : notion relative à la vérité d'une information et mesurant un défaut qualitatif de connaissance sur une mesure. Elle caractérise le degré de conformité de l'information par rapport à la réalité ou encore l'assurance d'une source en l'information fournie. L'incertitude fait référence à la nature de l'objet ou du fait concerné, à sa qualité, son essence ou son occurrence. Elle fait plutôt référence à des informations de type logique ou symbolique.

- *Imprécision* : concerne le contenu de l'information et mesure donc un défaut quantitatif de connaissance sur une mesure.
- *Incomplétude* : caractérise l'absence d'information apportée par la source sur certains aspects du problème. L'incomplétude de l'information peut être la cause de l'incertitude et de l'imprécision.
- *Redondance* : qualité de sources qui apportent plusieurs fois la même information. La fusion s'appuie sur la redondance des sources pour confirmer une information. Elle exprime la quantité d'information commune aux différentes sources d'informations disponibles. Idéalement, la redondance est exploitée pour réduire les incertitudes et les imprécisions.
- *Complémentarité* : propriété duale de la redondance, elle traduit l'absence d'information commune aux différentes sources. Elle est caractérisée par le fait que les sources ne fournissent en général pas d'informations sur les mêmes caractéristiques du phénomène observé. Elle sert à pallier à l'incomplétude. Elle est exploitée directement dans le processus de fusion pour avoir une information globale plus complète et pour lever les ambiguïtés.
- *Conflit* : caractérise deux ou plusieurs informations conduisant à des interprétations contradictoires et donc incompatibles. Les situations conflictuelles sont fréquentes dans les processus de fusion, et posent toujours des problèmes difficiles à résoudre.
- *Ambiguïté* : capacité d'une information à conduire à deux interprétations. Un des objectifs de la fusion est de lever les ambiguïtés d'une source grâce aux informations apportées par les autres sources ou par les connaissances supplémentaires.

3.3.5.2. Contraintes d'une solution multi-sources

La solution multi-sources choisie dans le cadre de cette thèse présente des avantages basés sur l'exploitation de la redondance et de la complémentarité des données provenant des différentes sources utilisées. La redondance permet ainsi de réduire l'incertitude sur l'information et d'augmenter la robustesse du système face à une panne d'une des sources. La complémentarité permet d'avoir une information globale plus complète et de lever les ambiguïtés. Cette solution multi-sources permet de bénéficier des avantages des différentes sources ainsi que de pallier aux limitations des sources prises indépendamment. Cependant, une telle solution pose des problèmes de mise en œuvre dans laquelle, il convient de tenir compte de plusieurs contraintes parmi lesquelles on cite :

- le choix de l'architecture de fusion : il n'y a pas de théorie absolue pour guider le choix d'une architecture [103]. Idéalement, la décision doit être prise en prenant en compte toutes les informations des sources intervenant dans le processus de fusion. Ce type de décision correspond à une architecture centralisée qui est toutefois complexe et pousse parfois à recourir à une architecture décentralisée.
- le choix du niveau de fusion : le choix du niveau de fusion doit se faire en fonction des données disponibles et de l'architecture de fusion retenue, toutes deux liées à l'application recherchée.
- le choix des sources d'informations ou des capteurs à fusionner : ce tâche repose généralement sur l'expérience et l'intuition du concepteur. La justesse de ce choix ne peut être vérifiée qu'a posteriori en fonction des résultats obtenus [103].
- la synchronisation des données : le temps intervient fortement puisqu'il faut que le processus de fusion soit capable de traiter en temps réel une quantité importante d'informations. En outre, il faut également gérer un processus d'arrivée d'informations asynchrones et avec différentes cadences comme cela a déjà été décrit précédemment.
- le choix d'une stratégie de fusion : à ce stade, le processus de fusion doit prendre la meilleure décision en fonction des informations fournies par les sources [103].

3.3.5.3. Contraintes temps-réel

La contrainte temps-réel est primordiale en fusion de données. Le temps intervient fortement dans le processus de fusion d'informations. Il faut être capable de gérer un processus d'arrivée d'informations asynchrones, avec des cadences diverses. Un recalage temporel est nécessaire du fait que les

algorithmes de fusion peuvent utiliser conjointement des données brutes et des données provenant d'estimations [98]. Cette mise à l'échelle temporelle des informations est nécessaire pour recalculer les informations initiales en informations équivalentes dans l'espace commun où s'effectuera la fusion [57].

3.4. Formalismes de fusion de données

Les principales méthodes de fusion d'informations sont issues essentiellement de deux cadres de modélisation, les probabilités et les approches floues. Des probabilités sont issues les approches bayésiennes ainsi que les méthodes issues de la théorie des croyances. Des approches floues, reposant sur la théorie des sous-ensembles flous, est issue la théorie des possibilités [128]. Cette section décrit ces trois principaux formalismes de fusion et leurs champs d'application respectifs.

Nous considérons dans la suite que nous disposons de m sources S_j avec $j \in [1, m]$. Chaque source S_j est caractérisée par l'information notée $s_j(x)$ qu'elle fournit de x (l'information à estimer). Ces sources doivent prendre une décision sur une observation x dans un ensemble de n décisions d_1, \dots, d_n . Par exemple la décision correspond au fait que l'observation x vérifie une hypothèse H_i , ou encore dans le cadre de la classification, que l'observation x appartient à la classe C_i , $x \in C_i$. Chaque source S_j fournit une information $M_i^j(x)$ sur la décision d_i pour l'observation x .

3.4.1. Théorie des probabilités : inférence bayésienne

La théorie des probabilités traite essentiellement de l'incertitude de l'information. Elle a l'avantage de reposer sur une formalisation mathématique solide. Cependant, la théorie des probabilités n'est pas la mieux adaptée pour représenter l'information contenue dans des données [1].

Dans le cadre probabiliste, les imperfections de l'information et les informations elles-mêmes sont modélisées à partir de distributions de probabilités ou de mesures statistiques à estimer [128]. L'inférence bayésienne est la méthode de combinaison privilégiée dans la théorie des probabilités. Elle se décline dans le cas continu comme dans le cas discret. Les différentes étapes du processus de fusion pour cette méthode bayésienne sont les suivantes :

3.4.1.1. Modélisation

L'étape de modélisation est fondée sur les probabilités conditionnelles, par exemple, la probabilité pour qu'un pixel appartienne à une classe particulière, étant donnée les images disponibles.

Pour chaque source d'information, on dispose des probabilités conditionnelles $M_i^j(x) = p(d_i | S_j)$ modélisant l'incertitude sur les mesures, c'est-à-dire la probabilité d'avoir la décision d_i (l'observation x vérifie une hypothèse H_i) sachant que la source d'information S_j l'a fournie. Dans cette approche probabiliste, les décisions ne peuvent être qu'exclusives et exhaustives [128]. L'exclusivité est définie comme étant le fait d'avoir une seule hypothèse ou décision qui est vraie à la fois. Si une hypothèse est vraie, toutes les autres hypothèses sont fausses. L'exhaustivité est définie comme étant le fait qu'une vérité corresponde au moins à une des hypothèses ou décisions possibles.

3.4.1.2. Estimation

A ce stade, les distributions de probabilités définies dans l'étape de modélisation sont estimées. On distingue alors deux cas :

- Cas discret : l'estimation de $p(d_i|S_j)$ est faite par dénombrement en appliquant la formule de Bayes [87], [128] :

$$p(A|B) = \frac{p(B|A)p(A)}{p(B)} \quad \text{Équation 3-1}$$

- Cas continu : l'estimation consiste à approcher les distributions $p(d_i|S_j)$. Les distributions gaussiennes sont largement utilisées pour cette estimation.

3.4.1.3. Combinaison

Cette étape consiste à combiner les informations des différentes sources S_j , c'est-à-dire à déterminer les probabilités $p(d_i|S_1, \dots, S_m)$ en utilisant la règle de Bayes. Elle peut s'effectuer de deux façons :

- Soit au niveau de la modélisation, en calculant les probabilités de la forme :

$$p(d_i|S_1, \dots, S_m) = \frac{p(S_1, \dots, S_m|d_i)p(d_i)}{p(S_1, \dots, S_m)} \quad \text{Équation 3-2}$$

où les différentes probabilités doivent être estimées par apprentissage dans l'étape d'estimation.

- Soit par la règle de Bayes elle-même, où chaque mesure vient mettre à jour l'information d'après les mesures précédemment obtenues par les autres capteurs :

$$p(d_i|S_1, \dots, S_m) = \frac{p(S_1|d_i)p(S_2|S_1, d_i)p(S_m|S_1, \dots, S_{m-1}, d_i)p(d_i)}{p(S_1)p(S_2|S_1)p(S_m|S_1, \dots, S_{m-1})} \quad \text{Équation 3-3}$$

Très souvent, étant données la complexité de l'apprentissage à partir de plusieurs capteurs et la difficulté d'obtenir des statistiques suffisantes, ces équations sont simplifiées sous l'hypothèse d'indépendance statistique des sources, conditionnellement à une décision [89], [116], [128]. Les formules précédentes deviennent alors :

$$p(d_i|S_1, \dots, S_m) = \frac{\prod_{j=1}^m p(S_j|d_i)p(d_i)}{\prod_{j=1}^m p(S_j)} \quad \text{Équation 3-4}$$

Cette équation fait apparaître clairement le type de combinaison des informations, sous la forme d'un produit, donc une combinaison conjonctive.

Cette fusion suppose une connaissance *a priori* forte (estimation des probabilités à priori $p(d_i)$ notamment), qu'il n'est pas toujours aisé d'obtenir. Cela constitue la principale limitation à l'utilisation de cette technique [116].

3.4.1.4. Décision

De très nombreux critères de décision ont été développés par les probabilistes et les statisticiens, ce qui laisse à l'utilisateur la possibilité de choisir en fonction de son application. Le critère le plus utilisé est celui du maximum de probabilité *a posteriori* :

$$d_k \text{ t.q. } p(d_k|S_1, \dots, S_m) = \max_{i \in \{1, \dots, n\}} p(d_i|S_1, \dots, S_m) \quad \text{Équation 3-5}$$

D'autres critères de décision peuvent également être employés. Parmi ceux-ci on peut citer l'espérance maximale, le maximum de vraisemblance, le maximum d'entropie, le risque minimal ou le critère

minmax consistant à prendre la décision d_k qui donne la performance maximale dans le cas le plus défavorable.

La qualité de la décision peut être contrôlée en comparant la probabilité résultante de la décision à un seuil. Ce contrôle peut éventuellement servir à rejeter la décision [116]. Le choix d'un critère de décision est guidé par le formalisme de la modélisation et de la combinaison [128].

La théorie des probabilités permet une bonne représentation de l'incertitude. En plus, elle est basée sur une base mathématique solide dont les outils permettent de gérer la majorité des cas qui peuvent être rencontrés. Cette théorie est très performante lorsque une approche statistique du problème à traiter est possible.. Comme cette théorie raisonne sur des singletons qui représentent les différentes solutions, l'espace de définition doit être exhaustif et exclusif. Ceci entraîne que le monde doit être fermé, hypothèse qui ne correspond pas toujours à la réalité [128]. En outre, elle ne permet pas de modéliser la méconnaissance (le fait que l'on ne sait pas) ni de gérer les conflits entre les sources. De plus, l'étape d'estimation est soumise à la difficulté d'estimer les probabilités *a priori*, nécessitant souvent de faire appel à une connaissance plus subjective de l'application.

La théorie des probabilités est l'une des théories les plus utilisées dans des applications pratiques, notamment en traitement d'images, en classification et reconnaissance de formes, etc [143].

3.4.2. Les sous-ensembles flous et la théorie des possibilités

La théorie des possibilités est beaucoup plus récente que la théorie des probabilités. Elle est assez souvent utilisée dans les applications pratiques. Ceci s'explique essentiellement par un besoin d'exprimer facilement la connaissance que peut avoir un utilisateur humain sur le phénomène observé. Elle est issue de la théorie des sous-ensembles flous qui permet une modélisation très souple des informations imprécises. Cette approche permet notamment [89], [128] :

- de représenter les imprécisions et les incertitudes des informations,
- de représenter des informations très hétérogènes, extraites directement des sources ou issues de connaissances externes, comme des connaissances expertes ou génériques sur un domaine ou un problème,
- d'introduire les différentes sémantiques possibles,
- de combiner des informations de multiples natures dans des situations très variées grâce à la richesse et la souplesse des opérateurs de combinaison proposés.

3.4.2.1. Notion de sous-ensembles flous

La théorie des sous-ensembles flous a été introduite par Zadeh en 1965. Elle est fondée sur le principe de l'appartenance partielle ou graduelle d'un individu à une classe donnée, ainsi que sur le fait qu'une classe n'a pas forcément des bornes strictes.

Les sous-ensembles flous sont très utiles lorsque la connaissance a priori sur un système est de nature experte, contrairement à la théorie des probabilités mieux adaptée à la connaissance statistique. On ne présente dans cette section que la notion de sous-ensembles flous nécessaire à la compréhension de la théorie des possibilités. Le lecteur désirant davantage de précisions quant aux sous-ensembles flous pourra se reporter notamment à [91].

Soit S un ensemble net⁴³ et x, y ses éléments. Soit A un sous-ensemble flou de S .

Un sous-ensemble flou⁴⁴ A de S est défini par sa fonction d'appartenance μ de S dans $[0,1]$. Pour tout x de S , $\mu(x)$ est la valeur dans $[0,1]$ représentant le degré d'appartenance de x au sous-

⁴³ Ensemble net : un ensemble de la théorie des ensembles.

⁴⁴ Sous ensemble flou : un ensemble de la théorie des sous ensembles flous.

ensemble flou A . La fonction d'appartenance définit complètement un sous-ensemble flou [128]. Un élément x peut appartenir à deux sous-ensembles flous.

Différentes notations sont souvent utilisées pour désigner ce sous-ensemble flou. Il peut être noté $\{(x, \mu_A(x)) : x \in A\}$ ou encore $\int_S \mu_A(x)/x$.

Exemple : prenons l'exemple de la température d'un liquide. On peut considérer qu'une température de 25°C caractérise une température tiède. Mais cette définition n'est pas précise car les températures comprises entre 20 et 30°C peuvent aussi être considérées comme tièdes. Cette plage de température peut être représentée par une fonction caractéristique (cf. Figure 3-7 (a)) mais quelles sont les températures à choisir pour la caractériser au mieux ? Entre 20 et 30°C ou entre 15 et 35°C ? Avec la théorie des sous-ensembles, il est possible de représenter cette température en prenant en compte des températures ni trop éloignées de 25°C ni trop proches (cf. Figure 3-7 (b)). On emploie alors des ensembles dénommés fonctions d'appartenance.

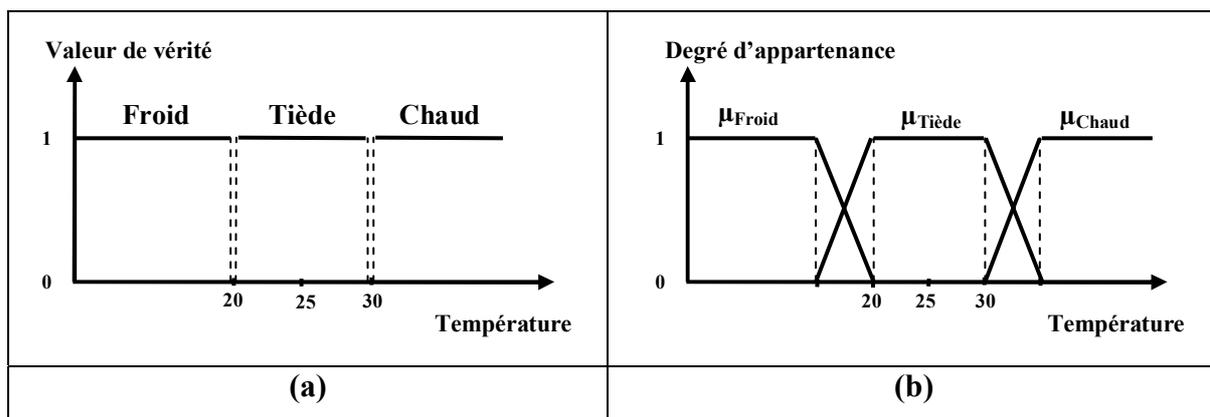


Figure 3-7 : Sous-ensembles classiques et sous-ensembles flous

3.4.2.2. La théorie des possibilités

La théorie des possibilités, introduite par Zadeh à la fin des années 70, est issue du concept des sous-ensembles flous. Elle a ensuite été développée par plusieurs chercheurs, en particulier Dubois et Prade au niveau français [99]. Elle permet de représenter à la fois l'imprécision et l'incertitude par l'intermédiaire de mesures de possibilité et de nécessité. L'incertitude d'un événement est définie, d'une part par son degré de possibilité, et d'autre part par le degré de possibilité de l'évènement contraire (ce dernier s'interprétant comme le degré de nécessité). Ainsi, les événements $A \subset S$ sont caractérisés par deux fonctions, la possibilité Π et la nécessité N .

Mesure de possibilité : une mesure de possibilité est une fonction Π de $P(S)$ (c'est-à-dire l'ensemble des parties de S qui sont des sous-ensembles nets) dans $[0,1]$ telle que :

$$\Pi(\emptyset) = 0 \text{ et } \Pi(S) = 1$$

$$\forall I \subset N, \forall A_i \subseteq S, i \in I, \Pi(\cup_{i \in I} A_i) = \sup_{i \in I} \Pi(A_i) \quad \text{Équation 3-6}$$

Ainsi, plus la valeur d'une mesure de possibilité est proche de 1, plus la réalisation de l'évènement concerné est possible.

Mesure de nécessité : une mesure de nécessité est une fonction N de $P(S)$ dans $[0,1]$ telle que :

$$N(\emptyset) = 0 \text{ et } N(S) = 1$$

$$\forall I \subset N, \forall A_i \subseteq S, i \in I, N(\cap_{i \in I} A_i) = \inf_{i \in I} N(A_i) \quad \text{Équation 3-7}$$

La valeur de la fonction de nécessité pour un évènement donné indique le degré de certitude de réalisation de cet évènement. **Plus la mesure de nécessité est proche de 1, plus la certitude de la réalisation de l'évènement est grande.**

Ces deux mesures vérifient un certain nombre de propriétés :

- $\forall A \subseteq S, \Pi(A) = 0 \Leftrightarrow A$ est impossible
- $\forall A \subseteq S, N(A) = 1 \Leftrightarrow A$ est certain
- $\forall A \subseteq S, \Pi(A) = 1 \Leftrightarrow A$ est complètement possible mais non certain
- $\forall A \subseteq S, \Pi(A) \prec N(A)$
- $\forall A \subseteq S, N(A) = 1 - \Pi(\bar{A})$ où \bar{A} est le complémentaire de A (évènement contraire)

Distributions de possibilité

Les distributions de possibilité permettent d'attribuer un degré de possibilité à tout élément de S , et non plus de $P(S)$.

Une distribution de possibilité est une fonction π de S dans $[0,1]$ vérifiant la propriété de normalisation :

$$\sup_{s \in S} \pi(s) = 1 \quad \text{Équation 3-8}$$

Cette condition correspond à une hypothèse de monde fermé, dans lequel au moins un élément de S est complètement possible. Cette condition peut être relâchée dans une hypothèse de monde ouvert [89].

Dans le cas fini, une mesure de possibilité peut être construite à partir d'une distribution de possibilité par la formule :

$$\forall A \subseteq S, \Pi(A) = \sup_{s \in A} \pi(s) \quad \text{Équation 3-9}$$

Inversement, une distribution de possibilité peut être déduite d'une mesure de possibilité par la formule :

$$\forall s \in S, \pi(s) = \Pi(\{s\}) \quad \text{Équation 3-10}$$

Du fait de la dualité, une mesure de nécessité peut être construite à partir d'une distribution de possibilité par la formule :

$$\forall A \subseteq S, N(A) = 1 - \sup_{s \notin A} \pi(s) = \inf_{s \in \bar{A}} (1 - \pi(s)) \quad \text{Équation 3-11}$$

3.4.2.3. Fusion d'informations par la théorie des possibilités

Les différentes étapes du processus de fusion pour cette méthode possibiliste sont les suivantes :

Modélisation

Si on prend la même notation que la méthode probabiliste, chaque source S_j fournit une information représentée par $M_i^j(x)$ sur la décision d_i quant à l'observation x . Cette information est modélisée en considérant les fonctions d'appartenance de sous-ensembles flous correspondant à l'exactitude d'une décision :

$$M_i^j(x) = \mu_i^j(x) \quad \text{Équation 3-12}$$

où $\mu_i^j(x)$ représente le degré d'exactitude de la décision d_i prise pour l'observation x selon la source S_j . En classification, c'est le degré d'appartenance d'une observation x à une classe C_i .

Une autre forme de modélisation est celle considérant une distribution de possibilité d'une décision pour une observation sur l'ensemble des hypothèses (ensemble de discernement D) :

$$M_i^j(x) = \pi_i^j(d_i) \quad \text{Équation 3-13}$$

où $\pi_i^j(d_i)$ représente le degré de possibilité pour que la décision d_i soit valide pour l'observation x selon la source S_j . En classification, c'est le degré de possibilité pour que la vraie classe de l'observation x soit C_i selon la source S_j .

On définit aussi la nécessité d'une décision d_i pour une source S_j comme :

$$N_i^j(d_i) = 1 - \pi_i^j(\bar{d}_i) \quad \text{Équation 3-14}$$

où $\bar{d}_i = D - d_i$ est le complément de d_i dans l'ensemble de discernement D .

Estimation

La difficulté des deux approches de modélisation décrites ci-dessus réside dans l'estimation des fonctions d'appartenance ou des distributions de possibilités. Cette partie ne sera pas détaillée dans cette section. Le lecteur intéressé peut se référer aux références [89] et [128].

Combinaison

La particularité de la théorie des possibilités, c'est qu'elle propose un grand nombre d'opérateurs de combinaison, ce qui lui confère une grande adaptabilité au problème traité. Parmi ces opérateurs on cite :

- Les opérateurs **conjonctifs** : ils combinent les informations à la façon d'un *ET* logique (conjonction). Ils sont utilisés quand les sources sont concordantes. Les opérateurs conjonctifs les plus employés sont les *normes triangulaires* ou *t-norme*,
- Les opérateurs **disjonctifs** : ils combinent les informations à la façon d'un *OU* logique (disjonction). Ils sont utilisés quand les sources sont discordantes. Les opérateurs disjonctifs les plus employés sont les *conormes triangulaires* ou *t-conorme*,
- Opérateurs **adaptatifs** : ces opérateurs, proposés par Dubois et Prade, sont adaptatifs en fonction du conflit entre des distributions de possibilité. Ils se comportent comme un minimum s'il y a peu de conflit entre les distributions de possibilité et comme un maximum si le conflit est fort [89]. Ces opérateurs perdent la propriété d'associativité, ce qui rend la fusion plus délicate à obtenir [116],
- Les **intégrales floues** : elles ont été introduites par Sugeno. Deux types d'intégrales floues sont populaires : l'intégrale de Sugeno et l'intégrale de Choquet [128],
- Opérateurs **hybrides** : ces opérateurs mélangent les *t-normes* et les *t-conormes* [128].

Décision

Après avoir combinées les différentes sources entre elles, la décision s'effectue en prenant le maximum des distributions de possibilités (ou des fonctions d'appartenance) résultantes.

La qualité de la décision est évaluée selon son critère de **netteté** et de **discrimination** [89] :

- La netteté de la décision : le résultat de la décision (maximum des distributions de possibilités) est comparé à un seuil défini selon l'application,
- Discrimination de la décision : la décision est évaluée en comparant les deux plus fortes valeurs.

Dans le cas où ces deux critères ne sont pas vérifiés, une décision de rejet est prise.

L'intérêt de la théorie des possibilités est qu'elle est bien adaptée à la modélisation de l'imprécision et de l'incertitude. Elle permet de prendre en considération les conflits entre les sources en utilisant les

opérateurs adaptatifs. En outre, elle permet de combiner des informations très variées grâce à la richesse et la souplesse des opérateurs proposés. Néanmoins, la principale limitation, est le choix des opérateurs qui est une tâche délicate.

Les applications de la théorie des possibilités sont variées : robotique, traitement d'images, classification, etc.. Dans [116] elle a par exemple été utilisée pour la fusion des courbures issues d'un système à base de caméra et d'un radar pour la localisation et le suivi d'obstacles sur la chaussée.

3.4.3. Théorie des croyances

La théorie des croyances, appelée aussi théorie de l'évidence ou théorie de Dempster-Shafer fut introduite par Dempster [96] puis reprise avec un formalisme mathématique plus abouti par Shafer [147]. Cette théorie peut être vue comme une généralisation de la théorie des probabilités. Elle repose sur la modélisation de la croyance en un événement. Cette modélisation est réalisée à partir de fonctions de masse permettant une bonne représentation des connaissances [128].

Un des atouts essentiels de cette théorie, tout comme la théorie des possibilités, est qu'elle manipule des sous-ensembles plutôt que des singletons. Ceci lui confère une grande souplesse de modélisation pour de multiples situations rencontrées en fusion de données. Elle fournit également des représentations à la fois de l'incertitude, de l'imprécision, et de l'ignorance. Cette théorie permet de mesurer des conflits entre les sources et de les interpréter en terme de fiabilité des sources, de monde ouvert ou de contradictions d'observations [89]. La notion de monde ouvert correspond au cas où des solutions en dehors de l'espace de définition sont envisageables. Dans le cas contraire, on parle de monde fermé : toutes les solutions possibles sont représentées dans cet espace de définition (cf. cadre de discernement ci-dessous).

De part ses principes de modélisation, la théorie des croyances demeure plus adaptée à des applications de classification qu'à des applications d'estimation.

Cette section entend décrire les différentes étapes du processus de fusion par la théorie des croyances.

3.4.3.1. Modélisation :

La théorie des croyances repose sur la manipulation de fonctions définies sur des sous-ensembles et non sur des singletons comme dans la théorie des probabilités. Ces fonctions sont habituellement définies dans l'intervalle $[0,1]$, et sont appelées *fonctions de masse*, *masses élémentaires* ou encore *masses de croyance*.

La théorie des croyances nécessite la définition d'un ensemble D appelé *cadre de discernement*. Cet ensemble est constitué de N hypothèses d_i (toutes les décisions possibles). Cet ensemble peut également être l'ensemble de toutes les classes envisageables dans le cadre de la classification.

Fonction de masse :

Considérons le cadre de discernement $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ qui représente l'ensemble de toutes les décisions possibles. L'espace des fonctions de masse m est donné par l'ensemble de toutes les disjonctions possibles des décisions d_i noté :

$$2^D = \{\emptyset, \{d_1\}, \{d_2\}, \{d_1 \cup d_2\}, \{d_3\}, \{d_1 \cup d_3\}, \{d_2 \cup d_3\}, \{d_1 \cup d_2 \cup d_3\}, \dots, D\}$$

Une fonction de masse est définie comme une fonction de 2^D (ensemble des parties de D) dans $[0,1]$.

Pour une source S_j , la fonction de masse m_j vérifie en général :

$$\sum_{A \in 2^D} m_j(A) = 1 \quad \text{Équation 3-15}$$

La fonction de masse $m_j(A)$ représente la partie du degré de croyance placée exactement sur la proposition A donnée par la source S_j .

La différence avec la théorie des probabilités est que A peut être l'union de deux décisions d_1 et d_2 . C'est ce principe qui permet à la théorie des croyances de modéliser les imprécisions.

En général on impose :

$$m_j(\emptyset) = 0 \quad \text{Équation 3-16}$$

Cette contrainte correspond à une hypothèse de monde fermé, dans lequel toutes les décisions possibles sont représentées dans D . Au contraire, on peut accepter que des décisions hors de D soient envisageables. Ceci correspond à une hypothèse de monde ouvert, dans lequel les décisions ne sont pas exhaustives. Dans ce cas :

$$m_j(\emptyset) \succ 0 \quad \text{Équation 3-17}$$

Un **élément focal** est un élément A de 2^D tel que $m_j(A) \succ 0$.

Propriétés :

- Si $m_j(D) = 1$ et $m_j(A) = 0$ alors la source S_j est dans l'ignorance totale.
- Si $m_j(A) = 1$, alors la source S_j a une connaissance imprécise, elle ne croit qu'en A qui peut être une disjonction de décisions.
- Si $m_j(d_i) = 1$, alors la source S_j a une connaissance précise, elle croit pleinement en d_i .
- Si $m_j(A) = s$ et $m_j(D) = 1 - s$, avec $s \in [0,1]$, alors la source S_j a une connaissance incertaine et imprécise, elle croit en partie en A , mais rien de plus.

Fonction de crédibilité :

La *fonction de crédibilité* ou *fonction de croyance* permet de modéliser l'incertitude. La masse $m_j(A)$ représente la partie du degré de croyance placée exactement sur la proposition A . Pour prendre en compte toute la croyance placée sur cette même proposition, il convient aussi de rassembler les masses de toutes les propositions B qui impliquent A . En effet, de tels sous-ensembles B contribuent également à la croyance de A . Par conséquent, pour prendre en compte toute la croyance sur A , on calcule sa crédibilité Cr_j pour une source S_j . Elle est définie de l'ensemble 2^D sur l'ensemble $[0,1]$ par :

$$\forall A \in 2^D, Cr_j(A) = \sum_{B \subseteq A, B \neq \emptyset} m_j(B) \quad \text{Équation 3-18}$$

La fonction de croyance mesure la confiance totale que l'on a dans un sous-ensemble A . L'ensemble vide est exclu de la somme car il interviendrait à la fois dans l'évaluation de A et dans l'évaluation de son complémentaire \bar{A} [89].

La fonction de croyance satisfait pour tout $A_1, A_2, \dots, A_k \in 2^D$:

$$Cr_j\left(\bigcup_{i=1}^k A_i\right) \geq \sum_{I \subseteq \{1, \dots, k\}, I \neq \emptyset} (-1)^{|I|+1} Cr_j\left(\bigcap_{i \in I} A_i\right) \quad \text{Équation 3-19}$$

où $|I|$ désigne le cardinal de I , et tel que $Cr_j(\emptyset) = 0$ et $Cr_j(D) = 1$.

On peut obtenir la fonction de masse correspondant à la fonction de croyance par :

$$\forall A \in 2^D, m_j(A) = \sum_{B \subseteq A} (-1)^{|A-B|} Cr_j(B) \quad \text{Équation 3-20}$$

Dans l'hypothèse du monde ouvert on a :

$$Cr_j(D) = 1 - m_j(\emptyset) \quad \text{Équation 3-21}$$

Fonction de plausibilité :

La *fonction de plausibilité* permet de mesurer l'intensité avec laquelle on ne doute pas de la véracité de A . On mesure à quel point les informations issues d'une source ne s'opposent pas à la proposition A . Elle est définie de l'ensemble 2^D sur l'ensemble $[0,1]$ par :

$$\forall A \in 2^D, Pl_j(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m_j(B) = 1 - Cr_j(\bar{A}) \quad \text{Équation 3-22}$$

Plus généralement, pour tenir compte de l'hypothèse du monde ouvert, cette fonction peut être :

$$\forall A \in 2^D, Pl_j(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m_j(B) = Cr_j(D) - Cr_j(\bar{A}) \quad \text{Équation 3-23}$$

L'intervalle $[Cr_j(A), Pl_j(A)]$ est appelé intervalle de confiance et sa longueur est une mesure de l'ignorance que l'on a sur un évènement A et son complémentaire [89].

Affaiblissement :

L'affaiblissement des fonctions de masse permet de modéliser la fiabilité des sources S_j en introduisant un coefficient α_j . En tenant compte de ces coefficients de fiabilité les nouvelles masses m'_j sont calculées à partir des masses initiales m_j comme suit :

$$\forall A \in 2^D, A \neq D, \begin{cases} m'_j(A) = \alpha_j m_j(A) \\ m'_j(D) = 1 - \alpha_j (1 - m_j(D)) \end{cases} \quad \text{Équation 3-24}$$

$\alpha_j \in [0,1]$ est le *coefficient d'affaiblissement* de la source S_j .

Dans le cas où $\alpha_j = 0$, la source S_j n'est pas du tout fiable, et dans ce cas toute la masse est affectée à D : $m_j(D) = 1$, ce qui représente l'ignorance totale. La valeur $\alpha_j = 1$ est utilisée pour une source fiable dans laquelle toute la masse est affectée aux singletons et où il n'y a aucune ambiguïté entre classes ou décisions [89]. L'affaiblissement de la fonction de masse entraîne l'affaiblissement de la fonction de croyance et le renforcement de la fonction de plausibilité. Ainsi, nous augmentons les intervalles $[Cr_j, Pl_j]$, et nous réduisons le conflit lors de l'étape de combinaison.

3.4.3.2. Estimation :

L'estimation des fonctions de masse et donc des fonctions de croyance est un problème difficile n'ayant pas de solution universelle. Plusieurs fonctions de masse ont été proposées dans la littérature et leur choix relève de la modélisation et doit être fait selon les données et l'application recherchée. Différentes estimations sont associées aux différentes fonctions de masse. On ne présente ici que les plus usitées.

Fonction sur les singletons :

Une manière simple consiste à calculer les masses sur les singletons dans une source S_j . Ceci est fait dans le cas où cette source n'a de connaissance que sur les singletons. L'estimation peut être :

$$\begin{cases} m_j(d_i) = M_i^j \\ m_j(A) = 0, \text{ si } A \notin \{\{d_1\}, \{d_2\}, \dots, \{d_n\}\} \end{cases} \quad \text{Équation 3-25}$$

Pour une observation x , la fonction de masse $m_j(d_i)(x) = M_i^j(x)$ où $M_i^j(x)$ est estimée le plus souvent comme une probabilité. Les masses sur tous les autres sous-ensembles de D sont alors nulles. Cette approche est cependant réductrice. Beaucoup d'approches s'appuient toutefois sur un tel modèle initial, puis répartissent les masses sur l'ensemble des hypothèses composées ou n'utilisent que certaines hypothèses composées, dans une démarche simplificatrice et souvent très heuristique [89].

Modification de modèles probabilistes :

Les modèles probabilistes reposent sur l'estimation de la probabilité $p(S_j|d_i)$ ou $p(f_j(x)|d_i)$. Le modèle le plus simple et le plus souvent utilisé consiste à utiliser la technique d'affaiblissement :

$$\begin{cases} m_{ji}(d_i)(x) = \alpha_{ij} M_{ij} \\ m_{ji}(\bar{d}_i)(x) = \alpha_{ij} (1 - M_{ij}) \\ m_{ji}(D)(x) = 1 - \alpha_{ij} \end{cases} \quad \text{Équation 3-26}$$

où $\alpha_{ij} \in [0,1]$ sont les coefficients d'affaiblissement. Cette technique est souvent employée pour affaiblir une source en fonction de sa fiabilité, et permet d'affecter une masse à D qui sera faible si la source est fiable et importante si la source ne l'est pas [89].

Deux autres modèles ont été proposés par Appriou [86] et supposent une estimation initiale de probabilités conditionnelles $p(f_j(x)|d_i)$ (notée plus simplement $p(S_j|d_i)$). La fonction de masse associée à une source est calculée par combinaison de fonctions de masse associées à chaque singleton.

Modèles de distances :

Une approche ne faisant pas appel aux probabilités et issue de la reconnaissance des formes a été proposée par Denoeux [97]. Les fonctions de masse et les fonctions de croyance sont construites à partir des vecteurs d'apprentissage. Une version de cette méthode consiste à considérer chaque classe d_i par des prototypes (un ou plusieurs points représentant la classe). En pratique un seul point est retenu, le centre de la classe \mathbf{x}_i estimé sur les données d'apprentissage. Dans cette approche seuls $\{d_i\}$ et D sont considérés comme éléments focaux :

$$\begin{cases} m_j(d_i|\mathbf{x}_i)(x) = \alpha_{ij} e^{-\gamma d^2(x, \mathbf{x}_i)} \\ m_j(D|\mathbf{x}_i)(x) = 1 - \alpha_{ij} e^{-\gamma d^2(x, \mathbf{x}_i)} \end{cases} \quad \text{Équation 3-27}$$

Les paramètres α et γ permettent de jouer sur la quantité d'ignorance et la forme des fonctions de masse. La distance $d^2(x, \mathbf{x}_i)$ permet d'affecter une masse d'autant plus importante que x ressemble à la classe C_i .

3.4.3.3. Combinaison :

Plusieurs modes de combinaison ont été proposés dans le cadre de la théorie des croyances. On peut principalement distinguer deux types de combinaison : la combinaison conjonctive et la combinaison disjonctive d'où sont issus un grand nombre d'opérateurs, dont des opérateurs de combinaisons mixtes [128].

Combinaison conjonctive

Cette approche a été introduite par Dempster [96] et reprise par Shafer [147]. Elle se fait par construction d'un jeu de masse unique en considérant les intersections des sources distinctes définies sur le référentiel 2^D .

Loi de combinaison de Dempster-Shafer :

La loi de combinaison (ou somme) orthogonale de Dempster-Shafer est un outil qui permet de renforcer la croyance sur les événements pour lesquels les sources sont en accord, et au contraire de l'atténuer lorsque les sources sont en conflit [116]. Le jeu de masse résultant pour tout $A \in 2^D$ et pour m fonctions de masse est défini par :

$$m(A) = (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_m)(A) = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = A} \prod_{j=1}^m m_j(B_j) \quad \text{Équation 3-28}$$

Pour deux fonctions de masse, la combinaison orthogonale de Dempster-Shafer est donnée par :

$$m(A) = (m_1 \oplus m_2)(A) = \sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C) \quad \text{Équation 3-29}$$

Dans le cas de $m.n$ fonctions de masse m_{ji} :

$$m(A) = (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_m)(A) = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = A} \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m m_{ji}(B_j) \quad \text{Équation 3-30}$$

Conflit et normalisation :

Dans cette loi de combinaison non normalisée, la masse affectée à l'ensemble vide est en général non nulle. Elle s'interprète souvent comme le conflit entre les sources. Dans une hypothèse de monde ouvert, cette masse non nulle de l'ensemble vide peut représenter une solution non prévue dans D . Sous l'hypothèse du monde fermé, où l'ensemble de discernement doit être exhaustif, cette masse non nulle de l'ensemble vide n'est pas acceptable [89]. Il faut donc forcer la masse de l'ensemble vide à 0 et redistribuer cette masse conflictuelle sur toutes les autres masses. Ce qui conduit à normaliser les autres masses. La forme normalisée de la fonction de masse combinée pour tout $A \in 2^D$ est définie par :

$$\begin{cases} m(A) = \frac{1}{1-k} \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = A} \prod_{j=1}^m m_j(B_j), \text{ si } A \neq \emptyset \\ m(\emptyset) = 0 \end{cases} \quad \text{Équation 3-31}$$

où $k = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = \emptyset} \prod_{j=1}^m m_j(B_j) < 1$ est un facteur de normalisation qui représente une *mesure de conflit*

entre les sources encore appelé *inconsistance de la fusion* :

- Si $k = 1$ les sources sont en conflit total.
- Si $k = 0$ les sources sont en total accord.

Loi de combinaison de Smets :

Smets a proposé une forme normalisée sous la forme d'un modèle de fonctions de croyances transférables (*Transferable Belief Model*) [149]. Ce modèle distingue deux niveaux de traitement de l'information : le niveau crédal où les croyances sont manipulées et le niveau pignistique, utilisé lors du processus de prise de décision. Dans ce modèle la combinaison est définie par :

$$\begin{cases} m(A) = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = A \neq \emptyset} \prod_{j=1}^m m_j(B_j) \\ m(\emptyset) = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = \emptyset} \prod_{j=1}^m m_j(B_j) \end{cases} \quad \text{Équation 3-32}$$

Loi de combinaison de Yager :

Yager a proposé un modèle en monde fermé où la mesure du conflit est affectée au cadre de discernement total D [156]. Le conflit est ainsi transformé en ignorance. Dans cette méthode la combinaison pour tout $A \in 2^D, A \neq \emptyset$ est la suivante :

$$m(A) = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = A \neq \emptyset} \prod_{j=1}^m m_j(B_j) \quad \text{Équation 3-33}$$

et la masse de D est donnée par :

$$m(D) = m(D) + \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = \emptyset} \prod_{j=1}^m m_j(B_j) \quad \text{Équation 3-34}$$

Combinaison disjonctive

La combinaison disjonctive ne considère pas les intersections mais les unions. La combinaison de m fonctions de masse m_j pour tout $A \in 2^D$ est donnée par :

$$m(A) = \sum_{B_1 \cup \dots \cup B_m = A} \prod_{j=1}^m m_j(B_j) \quad \text{Équation 3-35}$$

Combinaison mixte

Dubois et Prade ont proposé une loi de combinaison mixte utilisant à la fois les combinaisons conjonctives et disjonctives afin de conserver leurs avantages respectifs [99]. Cette combinaison est donnée pour tout $A \in 2^D, A \neq \emptyset$ par :

$$m(A) = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = A} \prod_{j=1}^m m_j(B_j) + \sum_{\substack{B_1 \cup \dots \cup B_m = A \\ B_1 \cap \dots \cap B_m = \emptyset}} \prod_{j=1}^m m_j(B_j) \quad \text{Équation 3-36}$$

Cette combinaison est un bon compromis entre précision et fiabilité.

3.4.3.4. Décision :

Après avoir combinées les fonctions de masses de l'ensemble des sources, les fonctions de crédibilité et de plausibilité sont calculées à partir des équations (3-25) et (3-29). Celles-ci représentent respectivement la vraisemblance minimale et maximale de l'hypothèse considérée. Une hypothèse est alors définie sans ambiguïté lorsqu'il existe une hypothèse dont la crédibilité est supérieure à la plausibilité de toute autre hypothèse.

Dans la théorie des croyances, plusieurs règles de décision sont possibles. Le but est de déterminer l'hypothèse la plus vraisemblable d_i^* . Les règles les plus utilisées sont :

- Le maximum de plausibilité :

$$d_i^* \text{ t.q. } Pl(d_i^*)(x) = \max_{1 \leq k \leq n} Pl(d_k)(x) \quad \text{Équation 3-37}$$

Ce critère permet de déterminer la meilleure hypothèse au sens du degré de confiance qu'on lui accorde et constitue en cela, un critère de décision « optimiste ».

- Le maximum de crédibilité :

$$d_i^* \text{ t.q. } Cr(d_i^*)(x) = \max_{1 \leq k \leq n} Cr(d_k)(x) \quad \text{Équation 3-38}$$

Ce critère permet de déterminer la meilleure hypothèse en accordant un degré de croyance minimum à chacune d'elles. Il constitue en cela, un critère de décision « pessimiste ».

- Le maximum de probabilité pignistique de Smets [149] :

$$d_i^* \text{ t.q. } bet(d_i^*)(x) = \max_{1 \leq k \leq n} bet(d_k)(x) \quad \text{Équation 3-39}$$

où bet est la probabilité pignistique définie par :

$$bet(d_i) = \sum_{A \in 2^D, d_i \in A} \frac{m(A)}{|A|(1 - m(\emptyset))} \quad \text{Équation 3-40}$$

avec $|A|$ est le cardinal de A , le terme $\frac{m(A)}{|A|}$ permet de distribuer proportionnellement la masse

et le terme $\frac{1}{1 - m(\emptyset)}$ est un terme de normalisation dans le cas d'une combinaison en monde ouvert [128].

Ce critère de décision est un critère « prudent » particulièrement utile lorsqu'il faut faire face à des ambiguïtés.

Le principal intérêt de la théorie des croyances est sa capacité de modélisation de la méconnaissance. Elle est également bien adaptée à la modélisation de l'imprécision et de l'incertitude et permet de gérer

les conflits. La principale limitation de cette approche est sa complexité à croissance exponentielle selon la taille du cadre de discernement.

Dans le domaine de l'automobile, cette théorie à trouver de nombreuses applications. Elle a par exemple été utilisée en classification [97], pour la perception d'environnement dans le cadre du projet Européen CARSENSE [108], pour la localisation sur une cartographie numérique [103] et [153] ou encore pour la détection de panneaux dans le cadre de l'aide à la conduite [115].

3.4.4. Conclusions sur ces méthodes

Une confrontation de tous les formalismes de fusion de données est présentée dans le tableau suivant, intégrant les avantages et inconvénients de chaque formalisme.

	Théorie des probabilités	Théorie des possibilités	Théorie des croyances
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> – Bonne modélisation de l'incertitude – Base mathématique solide 	<ul style="list-style-type: none"> – Bien adaptée à la modélisation de l'imprécision 	<ul style="list-style-type: none"> – Bonne modélisation de l'imprécision – Bonne modélisation de la méconnaissance
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> – Mauvaise modélisation de l'imprécision – Raisonnement sur des singletons (nécessité d'un espace de définition en monde fermé) – Pas de modélisation de la méconnaissance 	<ul style="list-style-type: none"> – Problème du choix de l'opérateur de combinaison 	<ul style="list-style-type: none"> – Problème d'explosion combinatoire

Tableau 3-1 : Confrontation des formalismes de fusion de données

La méthode retenue dans cette thèse pour l'amélioration de la perception nocturne est la théorie des croyances. Celle-ci s'avère en effet particulièrement appropriée pour la représentation de l'imprécision et de l'incertitude. Par ailleurs, de part sa faculté de gestion des conflits entre les sources, la théorie des croyances sera à même de lever des ambiguïtés liées à l'utilisation d'informations imparfaites. Enfin, elle profère la possibilité d'évaluer les informations à la fois du point de vue de leur précision et de leur certitude.

Dans la suite de ce manuscrit sera présentée l'application de la théorie des croyances en vue de la détermination de situations de conduite. Dans ce dispositif d'assistance à la conduite, une fusion d'informations entre deux sources, un système de navigation et un système à base de caméra, sera détaillée (cf. § 4.3).

3.5. Conclusion

Le projet NAFS a pour objectif l'amélioration de la perception nocturne de l'environnement de conduite par le biais d'une commande active du système d'éclairage. Une assistance à la conduite de ce type, pour être efficace et fiable, d'une part ne peut s'appuyer exclusivement sur les capteurs

actuellement disponibles sur un véhicule et d'autre part nécessite très souvent des grandeurs difficilement mesurables. Le concept de capteur virtuel abordé dans ce chapitre est donc primordial pour disposer d'informations non quantifiables directement. C'est pourquoi, l'assistance développée dans cette thèse s'appuie très largement sur cette notion présentée dans la première partie de ce chapitre.

Par ailleurs, la fiabilité de l'assistance ne peut être obtenue qu'en utilisant plusieurs capteurs qui nécessitent à leurs tours un mécanisme permettant d'en extraire une décision robuste quant à l'environnement d'évolution du véhicule. Du fait du caractère aléatoire de certains phénomènes (bruits de mesure, niveau de représentation variable de la cartographie, etc.) mis en jeu dans un tel système, l'utilisation des concepts de fusion de données s'avère particulièrement indiquée ici. C'est pourquoi, dans ce chapitre les concepts généraux ainsi que les 3 formalismes de fusion de données (théories des probabilités, des possibilités et de la croyance) ont été présentés. La confrontation de ces formalismes a permis de retenir finalement la théorie des croyances comme outil de fusion dans le cadre de l'assistance visée. La suite de ce manuscrit s'attache à présenter les capteurs virtuels développés en ce sens.

4. Chapitre 4 : Capteurs virtuels pour NAFS

4.1. Introduction

Dans le cadre du projet NAFS, une caractérisation précise des situations de conduite est recherchée. Cette caractérisation a pour objectif d'assister le conducteur dans son activité de perception et d'analyse de la situation de conduite. Concrètement, cette aide doit se traduire par l'optimisation de l'éclairage AFS selon les situations de conduite en choisissant de manière anticipative la/les fonction(s) d'éclairage appropriée(s). L'utilisation d'un système de navigation peut fournir une information anticipative relative à l'environnement d'évolution du véhicule mais la nature ponctuelle de ses informations, la possibilité de pertes des signaux GPS ainsi que l'absence de mise à jour de la cartographie rendent son utilisation comme unique capteur délicate. Une première approche permettant de pallier au problème de la nature ponctuelle des informations et des attributs de la cartographie du système de navigation consiste à utiliser le concept de capteur virtuel. Ce dernier a été utilisé pour reconstruire des situations de conduite en amont du véhicule au lieu d'avoir des attributs assignés à chaque point de la cartographie.

Un système à base de caméra, et détectant les panneaux de signalisation de vitesses, peut également être utilisé pour l'identification de la situation de conduite. En effet, la réglementation concernant les limitations de vitesse constitue un bon indicateur pour déterminer la situation de conduite dans laquelle se trouve le véhicule et permet de lever certaines ambiguïtés liées à l'utilisation d'un SIG. Cependant, un tel dispositif souffre d'une portée de détection limitée à quelques dizaines de mètres. En outre, dans le cas de bifurcations, l'utilisation exclusive de cette solution ne permet pas de convenablement statuer sur les décisions à prendre. Par ailleurs, la présence de véhicules devant le véhicule équipé du dispositif de détection de panneaux peut masquer le panneau à analyser. C'est pourquoi, nous proposons d'entreprendre une fusion des informations du système de navigation avec celles d'un système de vision observant la situation en amont du véhicule et permettant de venir à bout de ces limitations liées à chaque systèmes.

Dans cette thèse, deux capteurs virtuels apportant une solution à ces différentes contraintes ont ainsi été développés. Le premier, appelé par la suite capteur d'horizon glissant évènementiel (HGE), est basé uniquement sur l'exploitation des données issues du système de navigation. Il permet de pallier au problème de la nature ponctuelle des informations contenues dans la base de données routière. Sur la base d'une analyse par automate d'états finis des attributs de la cartographie, l'horizon de conduite en amont du véhicule est défini par une succession d'évènements caractérisés par leur nature, leur longueur, etc. Cette démarche a pour principal intérêt de définir l'ensemble des situations de conduite sous la formes d'une succession d'évènements que le conducteur aura à négocier.

L'utilisation conjointe de ce capteur d'horizon glissant évènementiel et d'un capteur virtuel exploitant un SIG et un dispositif de détection de panneaux permet finalement de disposer d'une information plus précise et fiable sur les situations de conduite à considérer pour l'assistance du conducteur. Ce deuxième capteur utilise la théorie des croyances pour fusionner les données du SIG et celles du système de détection de limitation de vitesse.

Les deux capteurs virtuels développés sont présentés ci-dessous.

4.2. Capteur d'Horizon Glissant Évènementiel

4.2.1. Concept

Les systèmes de navigation embarqués disposent d'informations contextuelles concernant d'une part l'infrastructure et d'autre part les aménagements du réseau routier. Par conséquent, ils peuvent permettre au conducteur une meilleure évaluation de la situation de conduite en lui fournissant des informations primordiales sur la forme de la route en amont du véhicule (nature de la route, rayon de virage, nombre de voies, ...). Pour les fonctions d'aide à la conduite en général, et les fonctions d'éclairages en particulier, l'apport de la navigation semble évident et concerne en premier lieu l'identification, l'anticipation et la prédiction du profil routier, la présence d'obstacles, etc. [71].

Cependant, les systèmes de navigation automobile actuels s'appuient sur des données cartographiques et sur des moyens de localisation dont la précision générale est de 10 à 15m selon les régions. Cette précision est tout à fait adaptée aux exigences de l'aide à la navigation, notamment lorsqu'il s'agit d'avertir le conducteur d'un changement de direction avant un carrefour [49]. Néanmoins cette précision, fortement liée aux techniques de mesure GPS et à une résolution de la cartographie encore limitée, n'est pas suffisante dans le cas de la commande des systèmes d'aide à la conduite (ADAS).

Dans les cartographies actuelles, la géométrie de la route est essentiellement représentée par des points liés au centre de la route. Cette méthode de représentation est caractérisée par une précision relative de $\pm 5m$ [81] et utilise des points placés à intervalles non réguliers [94]. C'est pourquoi, dans le cadre du projet Européen PReVENT, les fournisseurs de cartographies mènent actuellement des réflexions concernant l'amélioration de leurs cartographies en vue du développement de systèmes d'aide à la conduite actifs s'appuyant sur ce type d'informations [141]. De plus, pour les systèmes de navigation actuels, l'information est ponctuelle et les attributs pertinents (ville, rond-point, intersection, tunnel, ...) sont associés aux points de la cartographie. Donc, chaque point défini dans la cartographie a ses propres attributs. Si cette approche donne une information ponctuelle par rapport à la position du véhicule, elle ne permet pas au conducteur d'avoir une vue globale de sa situation de conduite. Pourtant, ceci pourrait l'aider à analyser la tâche de conduite afin d'adapter ses manœuvres aux situations données.

Le capteur HGE développé dans cette thèse a pour objectif de fournir cette vision globalisée et basée sur des événements à partir des informations ponctuelles contenues dans la cartographie.

4.2.2. Méthodologie

La démarche que nous proposons dans ces travaux consiste à se rapprocher du mode d'analyse de l'environnement de conduite effectué par le conducteur. Ce dernier définit ses actions suite à une observation globale ou événementielle et non ponctuelle de la situation. Celle-ci lui permet alors de caractériser les situations de conduite à venir (prise de virage, intersections, passage d'un rond-point...). Ainsi, nous proposons, à partir des informations ponctuelles de la navigation, d'effectuer une globalisation de celles-ci afin de revenir à une description événementielle de l'activité de conduite.

Le principe du capteur virtuel d'Horizon Glissant Évènementiel (HGE) est illustré sur la Figure 4-1. En utilisant la localisation du véhicule obtenue par le système de navigation, une détermination de l'ensemble des chemins possibles est effectuée à partir de la cartographie routière. Ces chemins constituent l'horizon électronique (cf. Figure 4-2) [59], représentant une image de la route en amont du véhicule et associant aux points de la cartographie des attributs décrivant l'environnement du véhicule. Ces attributs représentent par exemple le nombre de voies de circulation, les limitations de vitesse, etc. relatifs aux éléments de l'horizon considéré. La démarche consiste alors à traduire ces chemins, définis initialement par une suite de points auxquels sont rattachés ces attributs, sous forme de successions de situations de conduite identifiées au préalable.

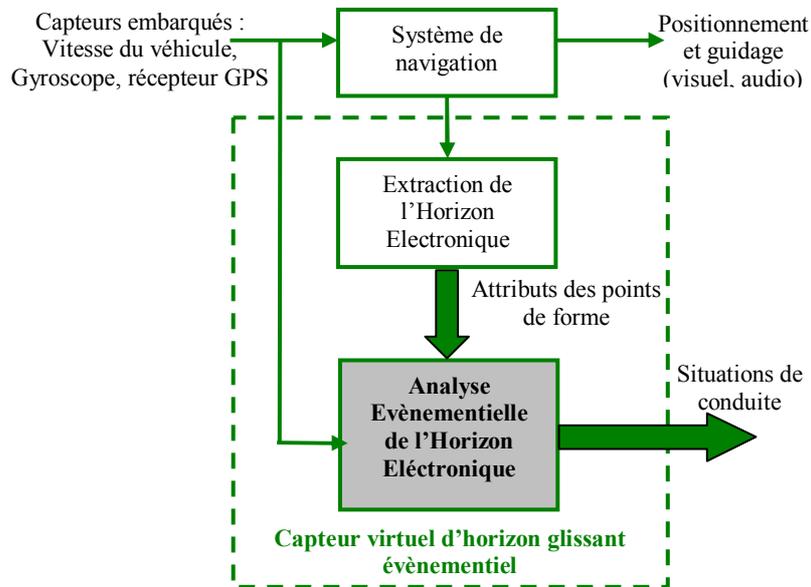


Figure 4-1 : Principe du capteur virtuel d'Horizon Glissant Évènementiel

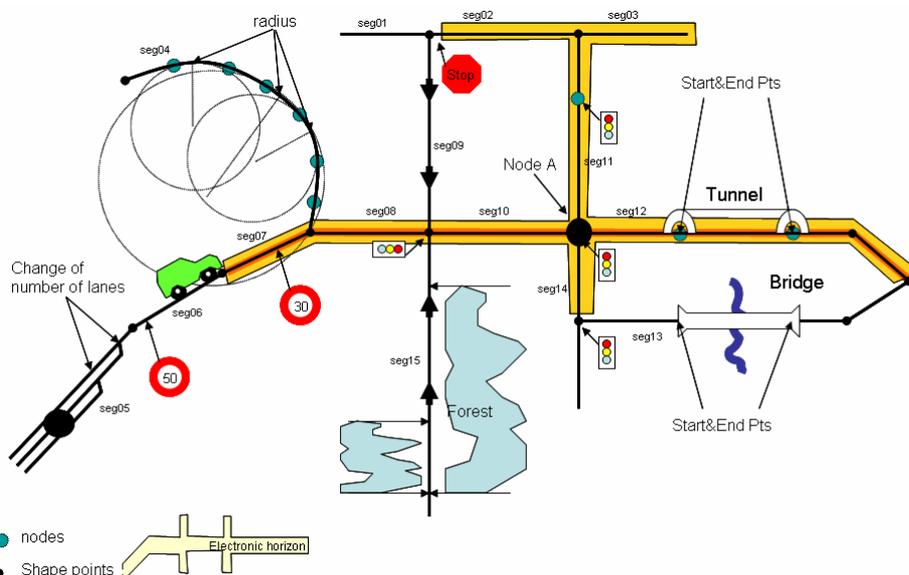


Figure 4-2 : Chemins empruntables selon la localisation du véhicule (Extrait de [59])

Dans ce travail, nous considérons qu'une situation de conduite est représentée par :

- L'état du véhicule (vitesse, accélération) et ses capacités potentielles,
- L'état du véhicule par rapport à l'environnement (position sur la route, position sur la voie),
- Les caractéristiques de l'environnement (autoroute, nombre de voies, types de lignes, ...),

4.2.3. Automate d'analyse évènementielle

La Figure 4-3 décrit les différentes étapes du procédé d'analyse évènementielle de l'horizon électronique. Ainsi, après l'extraction des chemins possibles, un automate d'états finis détermine les situations de conduite contenues dans cet horizon en analysant les attributs de tous les points constituant l'horizon.

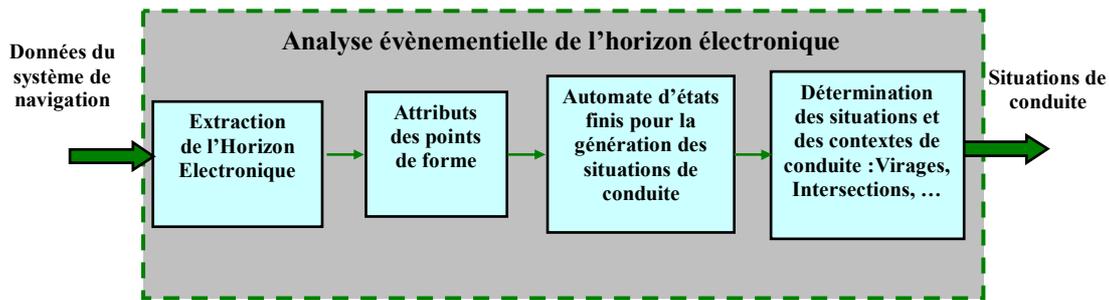


Figure 4-3 : Analyse évènementielle de l'horizon électronique

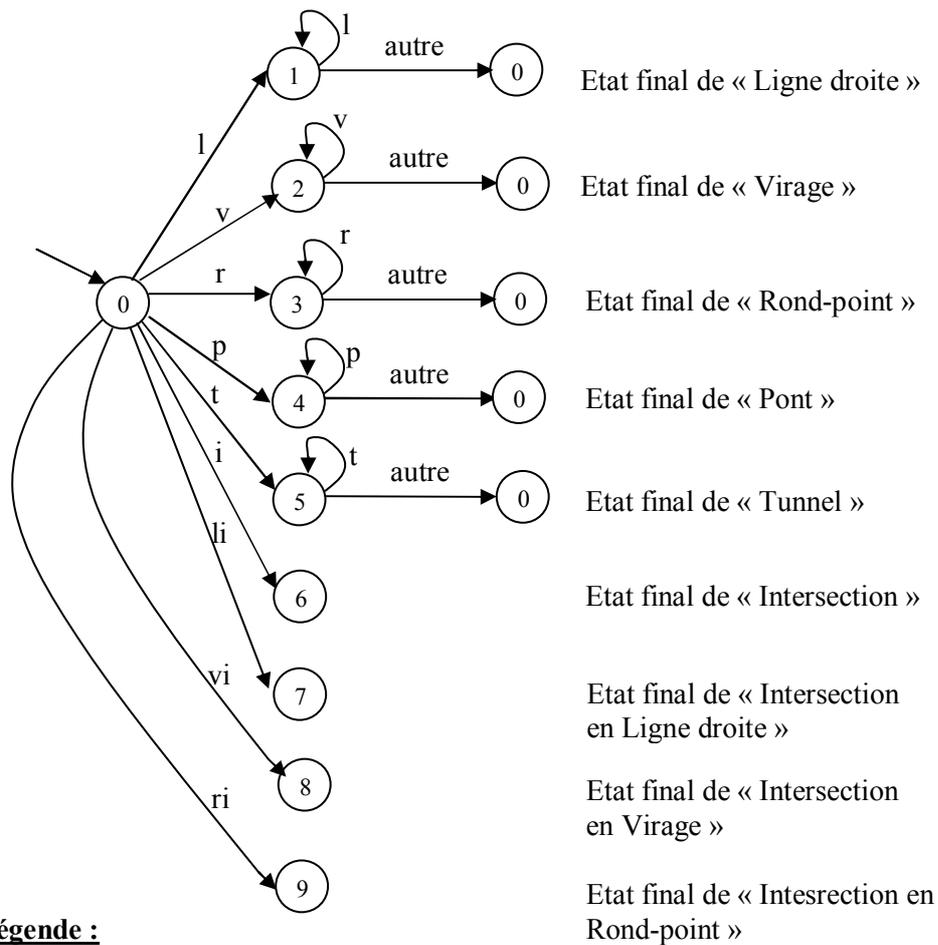
Pour réaliser cet automate d'états finis, l'identification des situations et contextes de conduite à prendre en considération a été effectuée en collaboration avec des experts en éclairage à Valeo. Ceci a été motivé par le fait que ce capteur est finalement destiné à l'optimisation de l'éclairage AFS. Les situations et contextes de conduite, rappelés dans le Tableau 4-1, correspondent donc à ceux déjà décrits dans le § 2.4.3. Ce tableau présente également les transitions utilisées dans l'automate d'états finis. Les transitions de l'automate d'états finis sont définies comme étant les changements de situations de conduite entre deux points consécutifs durant la scrutation de l'horizon électronique. L'horizon électronique pris ici est le chemin le plus probable d'ADASRP (« *Most Likely Path* »). A partir d'un attribut défini pour un point à un instant donné, on regarde l'attribut assigné au prochain point dans l'horizon électronique. Si ce point a le même attribut que le précédent, l'automate reste dans le même état (ligne droite par exemple). Dans le cas contraire, une transition selon le nouvel attribut est générée, permettant de passer à l'état correspondant à ce nouvel attribut (virage par exemple). En itérant sur l'ensemble de l'horizon électrique, cette démarche permet de délimiter les différentes situations de conduite.

Type d'évènement	Signification
<p style="text-align: center;">Situations de conduite</p>	<p>Situations dans lesquelles peut se trouver le véhicule à un instant donné et nécessitant une éventuelle utilisation des fonctions AFS :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intersection, • Rond-point, • Tunnel, • Pont, • Virage, • Ligne droite
<p style="text-align: center;">Transitions</p>	<p>Une transition a pour objectif de « délimiter » (début-fin) les situations de conduite dans l'horizon électronique. Durant la scrutation de l'horizon électronique, on détermine des changements de situations de conduite entre deux points consécutifs de l'horizon à partir des attributs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transition vers "Intersection", • Transition vers "Rond-point", • Transition vers "Tunnel", • Transition vers "Virage", • Transition vers "Ligne droite", • Transition vers "Intersection en Rond-point", • Transition vers "Intersection en Virage", • Transition vers "Intersection en Ligne droite"
<p style="text-align: center;">Contextes</p>	<p>L'environnement dans lequel se trouvent les situations de conduite:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Autoroute, • Ville, • Hors ville, • Autre

Tableau 4-1 : Situations, transitions et contextes de conduite identifiés

La Figure 4-4 décrit la structure d'analyse constituant l'automate d'états finis. A partir de l'état initial « 0 », la scrutation de l'horizon électronique permet d'identifier la/les transition(s) qui correspond(ent) aux situations de conduite identifiées (ligne droite, virage, rond-point, etc.) par les états de l'automate. Ensuite, tant qu'aucun nouvel attribut n'est détecté dans l'horizon électronique, l'automate reste dans l'état correspondant. Suite à la détection d'un changement d'attribut (« autre » sur la Figure 4-4), une fin de la situation de conduite est signalée (« état final » sur la figure) et une nouvelle transition correspondant à la nouvelle situation de conduite est générée selon cet attribut. A l'exception des intersections, l'ensemble des situations considérées est traité de cette manière. Dans ce dernier cas, une

intersection n'étant matérialisée dans la base de données cartographique que par un seul point (constituant à la fois le début et la fin de cette situation), l'automate, après détection de cette situation, atteint immédiatement l'état final considéré.



Légende :

- l** : transition vers ligne droite
- v** : transition vers virage
- i** : transition vers intersection
- r** : transition vers rond-point
- p** : transition vers pont
- t** : transition vers tunnel
- li** : transition vers intersection dans une ligne droite
- vi** : transition vers intersection dans un virage
- ri** : transition vers intersection dans un rond-point

Figure 4-4 : Automate d'analyse événementielle

Finalement, le capteur HGE définit les chemins accessibles au véhicule sous la forme d'un arbre décrivant toutes les situations de conduite et les contextes associés, en fonction de leur imminence. Ce passage est schématisé sur la Figure 4-5.

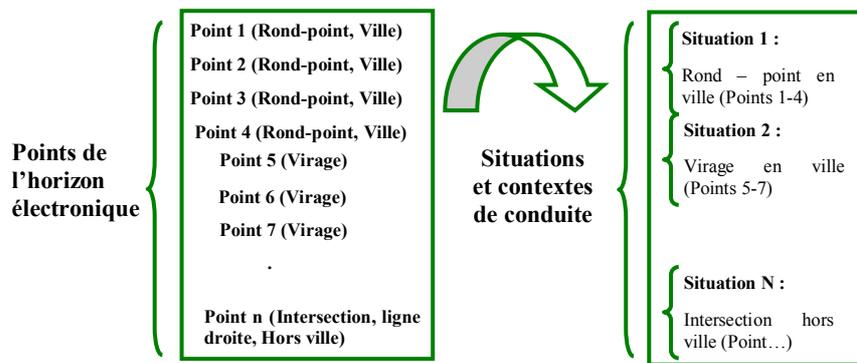


Figure 4-5: génération des situations et des contextes de conduite

Ce capteur d'horizon glissant évènementiel permet de pallier au problème de la nature ponctuelle des données du système de navigation et de délimiter ainsi les situations de conduite. Ce capteur représente une première analyse de l'environnement de conduite. Néanmoins, ces performances sont limitées du fait de l'incomplétude ou de l'imprécision des données contenues dans le SIG. Aussi, dans la section suivante, ce capteur est complété par d'autres critères issus de la navigation avant d'être utilisés dans un système de fusion de données avec des informations d'un système de détection de panneaux de limitations de vitesse. L'intérêt de cette fusion est de robustifier/fiabiliser la détermination des situations de conduite et ainsi d'assister le conducteur dans sa phase de perception mais également de définir les lois de commande adéquates lors d'une assistance active.

4.3. Capteur de détermination des situations de conduite

4.3.1. Introduction

Le problème souvent rencontré dans le développement de systèmes d'aide à la conduite est la caractérisation précise des situations de conduite. Ceci est principalement dû à l'imprécision et l'incertitude des données issues des différents capteurs. L'idée proposée dans ce travail consiste à fusionner ces informations dans un schéma de fusion de données pour s'affranchir de l'imperfection des données. Notre approche est basée sur la fusion entre un système de détection de panneaux de limitations de vitesse utilisant une caméra, et un système de navigation. A partir des images de la scène obtenues par la caméra, des algorithmes de traitement d'images permettent de détecter les panneaux de limitation de vitesses. Une reconnaissance des caractères qui y sont inscrits est alors effectuée. Ce système affiche alors la limitation de vitesse ainsi détectée et fournit également un indice de confiance de la détection. Cependant, le taux de fausse détection, ou l'absence de détection liée à un masquage du panneau (présence d'un obstacle, difficulté de détection à haute vitesse, détection de panneaux destinés à une catégorie particulière de véhicules...) rend ce système perfectible. En outre, dans des situations d'intersections, de bifurcations ou lors de la conduite sur des routes à plusieurs voies, de tels systèmes sont incapables de détecter efficacement les panneaux.

Par ailleurs, les SIG peuvent permettre de connaître à l'avance la géométrie de la route et associer à la localisation du véhicule des attributs renseignant sur la situation de conduite. A partir de ces attributs, il devient alors envisageable de définir la vitesse correspondante. Cependant, les cartographies actuelles souffrent en outre d'une précision encore trop faible pour garantir un niveau de fiabilité suffisant de l'assistance à la conduite active considérée dans ces travaux. L'idée consiste donc à combiner ces deux sources d'information anticipatives dans un système de fusion d'informations (cf. Figure 4-6). A partir du système de navigation et en utilisant les informations de l'horizon électronique, une première étape consiste exploiter le capteur d'horizon glissant évènementiel présenté précédemment afin de discriminer les situations de conduite. Ensuite, le processus de fusion détermine la limitation de vitesse avec précision en utilisant celle détectée par le système de vision et celle issue du système de navigation. La fiabilité du système de navigation est analysée à partir de 6 critères

déterminé par ce dernier. Sur la base de la situation de conduite retournée par le capteur virtuel HGE, le capteur virtuel de détermination de situations de conduite confirme ou infirme cette situation en se basant sur la limitation de vitesse issue de la fusion navigation-vision et sur les critères du système de navigation. La démarche s'appuie ici sur le fait que les niveaux de vitesse réglementaires dépendent principalement des contextes géographiques (zone urbaine, extra-urbaine...). Ainsi, l'utilisation des limitations de vitesse peut directement renseigner sur la situation de conduite considérée.

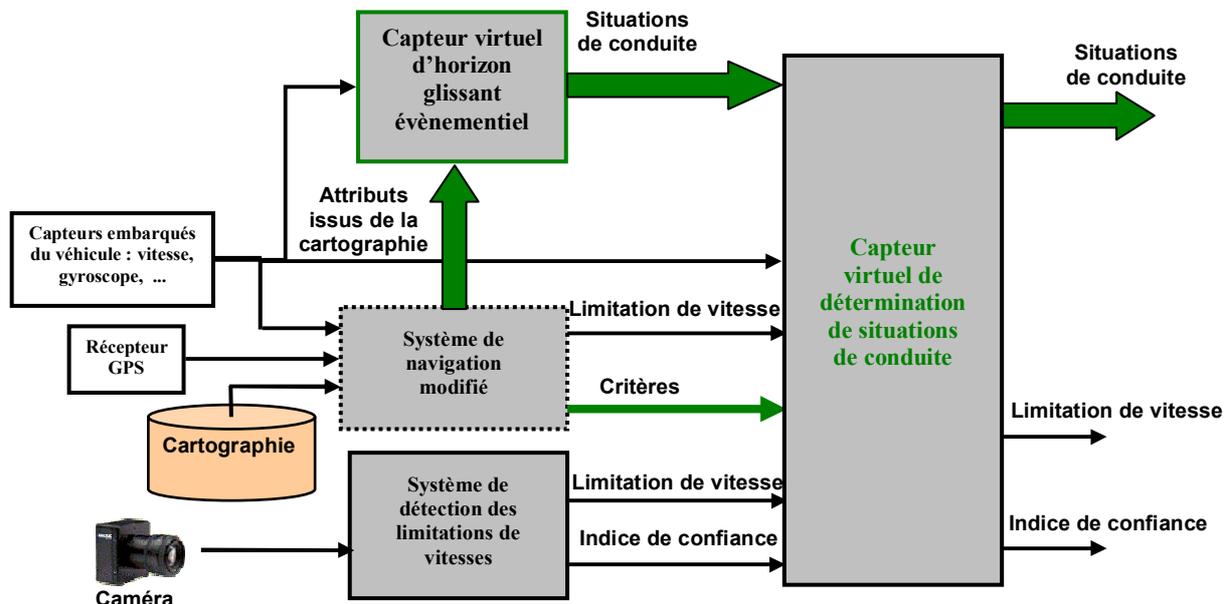


Figure 4-6 : Structure du système multi-capteurs de détection des situations de conduite

L'utilisation conjointe de ces deux sources d'information permet d'assurer une décision finale robuste, du fait de la redondance et de la complémentarité des données. La fusion s'appuie sur la redondance des sources pour confirmer une information [128]. Elle permet d'améliorer la précision de l'information et d'augmenter la tolérance aux pannes. En effet, la défaillance d'un capteur n'entraîne pas automatiquement la défaillance de l'ensemble du système. La complémentarité des informations quant à elle permet de lever les ambiguïtés [95] et de donner une information complète.

4.3.2. Fusion par la théorie des croyances

La fusion dans un environnement incertain a pour but de gérer et de modéliser les incertitudes contenues dans les données. Dans ce cas précis, la théorie des probabilités par inférence bayésienne peut être utilisée. Lorsque l'environnement est imprécis, la fusion concerne la modélisation explicite du manque d'informations dû aux imprécisions. La théorie des possibilités et la logique floue peuvent être utiles dans ce cas. Dans le cas d'un environnement imparfait, donc incertain et imprécis à la fois, on fait presque exclusivement appel à la théorie des croyances. Cette dernière dispose d'un formalisme de modélisation particulièrement adapté à la prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision d'une part, et des ambiguïtés et des conflits entre les sources d'informations d'autre part. Enfin, l'axiomatique relative à la théorie de l'évidence s'applique idéalement à des problématiques de classification ou d'identification d'une situation comme c'est le cas dans notre application. El Badaoui El Najjar précise que dans un contexte multi-sources nécessitant de tenir compte des spécificités des informations délivrées par chaque source, la théorie des croyances demeure la meilleure solution [103]. La théorie des croyances permet de répartir de la croyance non seulement sur les hypothèses élémentaires (singletons) mais aussi sur toutes les disjonctions de ces hypothèses. En outre, elle permet de modéliser l'ignorance et elle n'impose aucune relation entre un événement et sa négation [57].

Dans le cadre de notre problématique consistant à discriminer les situations de conduite en utilisant la fusion entre la navigation et un système basé sur la vision, l'imprécision et l'incertitude des informations doivent être considérées. En effet, comme cela a déjà pu être montré dans les chapitres précédents, de nombreux éléments peuvent être à l'origine d'une mauvaise localisation du véhicule sur la cartographie routière numérique :

- Les erreurs de positionnement du véhicule liées à une mauvaise réception des signaux satellitaires, aux problèmes de multi-trajets de ces signaux, aux approximations effectuées lors de la projection des coordonnées GPS dans le repère plan, à la fiabilité des capteurs inertiels, etc.
- Les erreurs de représentation de la cartographie liées aux procédés de relevés, aux modifications du réseau routier depuis les relevés ou encore aux règles de représentation numérique choisies (modélisation de l'axe central de la route, etc.).

S'agissant de la détection de panneaux de limitation de vitesse par traitement d'images vidéo, de nombreuses situations d'aberration sont également possibles. Celles-ci sont principalement liées au contexte de conduite nocturne et à l'hétérogénéité des situations considérées :

- la conduite à grande vitesse sur autoroute,
- la présence d'obstacles masquant les panneaux de signalisation,
- sur une même route, la dépendance entre les limitations de vitesse et les catégories de véhicules (voitures, camions ...) ou la voie de circulation empruntée,
- la multiplicité des panneaux à l'abord de certaines situations (intersections, sorties d'autoroutes...).

Ce dispositif dispose en outre d'une portée de détection d'une dizaine de mètres limitant quelque peu le degré d'anticipation lors de conduite à grande vitesse.

Compte tenu de l'ensemble de ces phénomènes, souvent aléatoires, pouvant détériorer la discrimination de situations de conduite, celui-ci doit être pris en compte dans la modélisation du processus afin de garantir un niveau de performances pertinent.

Devant ces remarques, le choix du formalisme de modélisation basé sur la théorie des croyances semble naturel du fait de l'imprécision et de l'incertitude des deux sources d'informations utilisées, de leur complémentarité et redondance, de la nécessité de gérer les conflits et finalement de l'objectif recherché. La connaissance *a priori* des différentes limitations de vitesse existantes dans la réglementation, leur exhaustivité et exclusivité, nous permet par ailleurs de définir aisément le cadre de discernement. L'exclusivité consiste à avoir une seule décision qui est vraie à la fois. L'exhaustivité est le fait d'avoir une décision qui correspond à au moins une des décisions définies dans le cadre de discernement.

4.3.3. Attributs extraits par le système de navigation

Le capteur virtuel HGE est mis à profit ici pour l'obtention d'attributs stockés dans la cartographie et permettant de statuer sur les situations de conduite. Ainsi, on s'intéresse en particulier à l'extraction de la base de données d'informations de limitations de vitesse et de critères exploités pour le calcul des masses de croyance du processus de fusion (cf. Figure 4-7). A ce stade, l'objectif est de définir, à partir de la navigation seule, d'une part un niveau de vitesse en relation avec la situation de conduite identifiée, et d'autre part un indice de confiance relatif à cette estimation. Cet indice de confiance accordé à la navigation est calculé à partir de plusieurs critères contenus dans la base de données routière.

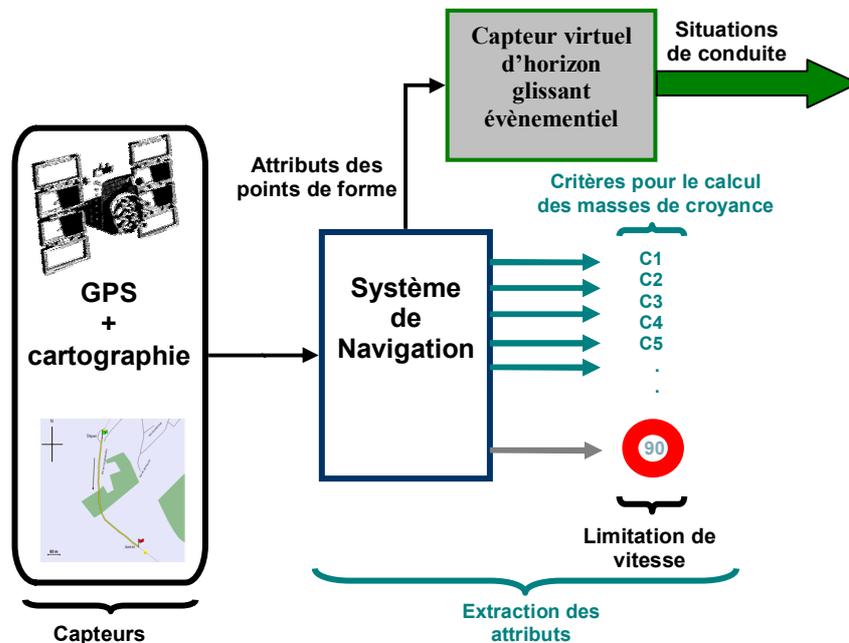


Figure 4-7 : Attributs du système de navigation

Finalement, à partir de l'outil de navigation ADASRP utilisé dans le cadre de ce projet (cf. § 5.3.1), six critères ont été retenus pour la détermination des masses de croyance des éléments focaux ainsi que pour le calcul de l'indice de confiance accordé à la navigation. Ces critères ont été définis comme suit :

- C1 : Indice de confiance du positionnement. Dans notre cas, ADASRP indique, en plus de la localisation du véhicule sur la cartographie, un indice de qualité (dénommé « Most Likely Candidate Probabiliy ») se rapportant à cette information. Cette probabilité est issue de la fusion interne opérée par le système de navigation entre les données inertielles et les mesures du GPS de la boîte de capteurs,
- C2 : Qualité de numérisation du réseau routier : ADASRP ayant été développé pour faciliter le prototypage rapide d'applications d'aide à la conduite ADAS, cet outil renseigne sur la qualité de la numérisation de la cartographie et son adéquation pour ce type de dispositifs. Il indique en effet si le chemin considéré est de définition suffisante pour permettre son utilisation dans une application ADAS,
- C3 : Classes fonctionnelles d'une route : FC1 ou FC2 (*Functional Class*). L'ensemble du réseau routier est caractérisé par cette information liée au type de routes considérées. Par exemple, la classe fonctionnelle FC1 s'applique aux autoroutes et aux routes européennes. La classe fonctionnelle FC2 s'applique aux grandes routes nationales. Selon sa catégorie d'appartenance, une route est représentée avec une définition plus ou moins fine dans la cartographie numérique. L'attribut de classes fonctionnelles est également utilisé par le système de navigation pour le calcul d'itinéraires en fonction du mode d'optimisation recherché (trajet le plus rapide, le plus court, etc.),
- C4 : Nature des routes (autoroute, route européenne, nationale, etc.) constituant le chemin considéré,
- C5 : Situations de conduite (ville, sortie d'autoroute, intersection, ...),
- C6 : Activation du mode guidage du système de navigation. Ce mode permet d'obtenir des ordres de direction de la part du dispositif de navigation après indication d'une destination à atteindre. AdasRP ne propose pas ce mode de fonctionnement. Néanmoins, ce critère a été retenu afin de garantir l'utilisation de ce système avec d'autres SIG.

4.3.4. Attributs extraits par la vision

Les attributs extraits à partir de la vision sont directement les limitations de vitesses identifiées par un algorithme de reconnaissance des panneaux de signalisation. Cet algorithme, développé dans le cadre

d'un autre projet mené par *Valeo Driving Assistance* en dehors de cette thèse, fournit également l'indice de confiance relatif à la détection effectuée.

4.3.5. Fusion des attributs

4.3.5.1. Description de la méthode

La Figure 4-8 illustre le schéma de fusion adopté dans notre approche.

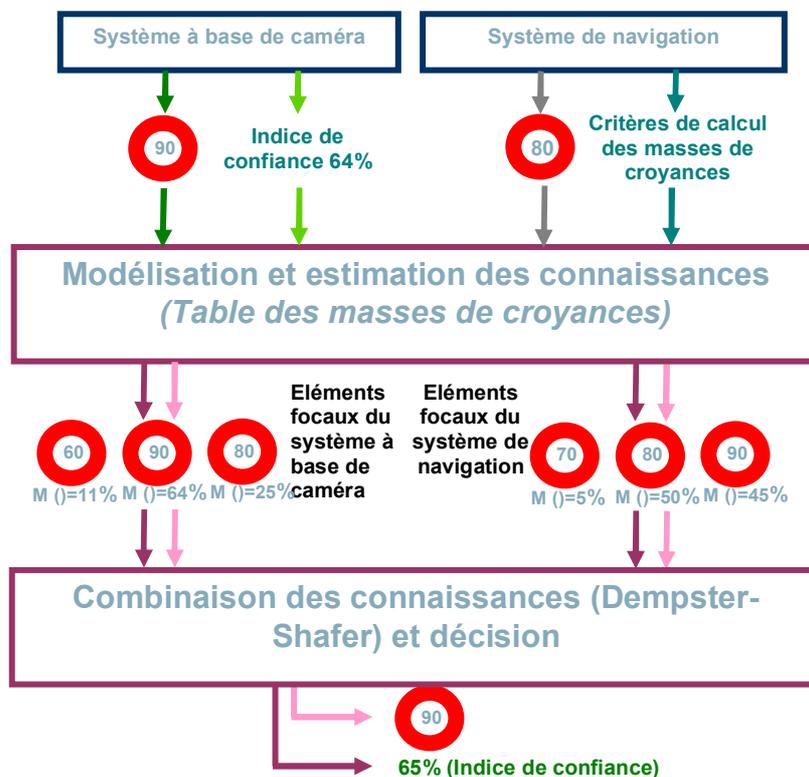


Figure 4-8 : Discrimination des situations de conduite par la théorie des croyances

A partir des vitesses déterminées par chaque système de manière indépendante, le processus de fusion identifie dans un premier temps (étape de modélisation et d'estimation) les éléments focaux relatifs aux deux détections (vision et navigation) ainsi que les masses de croyances associées. Dans un deuxième temps, la fusion est effectuée à l'aide de la règle de combinaison de Dempster-Shafer. Finalement, une vitesse ainsi qu'un indice de confiance sont obtenus.

Le cadre de discernement représente l'ensemble des limitations de vitesse pouvant être déterminé par les deux systèmes. Ce cadre a été défini de manière à modéliser les limitations de vitesse imposées par la réglementation routière. Il est défini comme suit :

$$D = \{5,10,20,30,45,50,60,70,80,90,100,110,120,130,999\}$$

Les limitations de vitesse de 5 à 30 km/h s'appliquent généralement dans des zones limitées (proximité d'établissements scolaires, de parkings, etc) mais primordiales pour notre application. La valeur 999 a été ajoutée afin de représenter à la fois des situations de conduite sans limitation de vitesse (situation courante par exemple en Allemagne) et des situations de fin de limitation de vitesse.

La modélisation et l'estimation des connaissances consistent à calculer les masses de croyance relatives aux critères issus de la navigation et de la caméra. Ces masses sont calculées pour toutes les limitations de vitesses probables. A partir des limitations de vitesses données par les deux systèmes, on

détermine toutes les limitations de vitesses probables (correspondant aux éléments focaux). Celles-ci tiennent compte de la possibilité que l'un des deux systèmes effectue un diagnostic erroné. La limitation de vitesse résultante (après fusion) est utilisée comme un moyen permettant d'identifier la situation de conduite. Si la limitation est par exemple inférieure à 50 km/h, on peut considérer que le véhicule évolue en zone urbaine, entre 50 et 90 km/h on peut conclure à une conduite soit extra-urbaine soit sur route urbaine rapide (la discrimination finale se fera alors grâce au capteur HGE).

4.3.5.2. Modélisation et estimation des connaissances

Masses de croyance du système de navigation

Les éléments focaux (donc de masses non nulles) ont été définis en considérant les erreurs de détermination de limitation de vitesse que peuvent commettre les deux systèmes. Généralement, les situations pendant lesquelles les deux systèmes peuvent se tromper concernent les sorties d'autoroute, les intersections, les routes parallèles à l'autoroute, etc. Ces situations représentent des cas où ces dispositifs peuvent donner des informations imprécises et incertaines rendant la décision dans ce cas complexe.

Les éléments focaux du système de navigation ont été définis afin de représenter les erreurs potentielles du SIG. Cette démarche permet de tenir compte des erreurs de localisation, des erreurs de numérisation de la cartographie, de l'absence d'attributs permettant de définir avec précision la situation de conduite, etc. Les éléments focaux définis pour toutes les limitations de vitesse possibles sont illustrés dans le Tableau 4-2.

Limitations de vitesses	Nombre de limitations de vitesses possibles	Limitations de vitesses possibles (éléments focaux)
5	1	50
10	1	50
20	1	50
30	1	50
45	2	30, 50
50	7	30, 70, 100, 110, 120, 130, 999
60	0	x
70	3	50, 80, 90
80	4	50, 60, 70, 90
90	2	50, 70
100	3	50, 70, 999
110	2	50, 70
120	3	50, 70, 999
130	2	50, 70
999	0	x

Tableau 4-2 : Eléments focaux de la navigation en fonction de la limitation de vitesse

Les masses de croyance correspondant aux éléments focaux de la navigation peuvent être calculées en utilisant l'équation d'affaiblissement définie dans le § 3.4.3.1 et appliquée aux 6 critères extraits de la navigation :

$$m(SL_i) = \frac{\alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 + \alpha_3 C_3 + \alpha_4 C_4 + \alpha_5 C_5 + \alpha_6 C_6}{\sum_i \alpha_i C_i}$$

Où $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ sont des coefficients d'affaiblissement ou poids assignés aux différents critères en fonction de la fiabilité de leurs informations. Les masses de ces critères sont données dans le Tableau 4-3. La distribution des masses de croyances s'effectuent en fonction de la connaissance que l'on a de la source à modéliser. Ces poids sont généralement définis par expérience et par expertise, en fonction des résultats d'essais du dispositif. Les masses de croyances permettent d'évaluer la véracité des propositions.

Prenons comme illustration le critère C1 représentant l'indice de confiance du GPS appelé MLCP (*Most Likely Candidate Probability*). Lorsque ce critère permet de garantir une localisation satisfaisante (MLPC supérieure à 0.6), on conclura à une bonne estimation de la limitation de vitesse donnée par le système de navigation en fixant la masse de croyance à 0.9. Si la localisation est incertaine (MLPC inférieure à 0.6), la masse de croyance attribuée à l'information de vitesse diminue afin que l'influence de ce critère sur la décision finale soit plus faible. De même, si le critère C4 (définissant la nature de la route sur laquelle se trouve le véhicule) correspond à une conduite sur autoroute, on accordera des masses de croyances non-nulles aux vitesses envisageables dans ce contexte de conduite et maximales pour des vitesses proches de 130km/h.

Les coefficients d'affaiblissement $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ sont définis empiriquement en effectuant des essais dans des conditions réelles et sur des enregistrements pour avoir une idée de la fiabilité des différents critères et leur impact sur le résultat final.

Critères	Limitations de vitesses														
	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	SL6	SL7	SL8	SL9	SL10	SL11	SL12	SL13	SL14	SL15
C1 : GPS MLCP Validé (≥ 0.6)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C1 : GPS MLCP entre ($0.3 \leq \text{MLCP} < 0.6$)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
C1 : GPS MLCP Non validé (< 0.3)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
C2 : Attribut ADAS Validé	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C2 : Attribut ADAS Non Validé	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
C3 : Classe fonctionnelle de la route (FC1, FC2) Validée	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C3 : Classe fonctionnelle de la route (FC1, FC2) Non Validée	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
C4 : Type de route : Européenne	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	0.9	1	1	1	1
C4 : Type de route : Autoroute	0	0	0	0	0	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	0.9	1	1	1	1
C4 : Type de route : Nationale	0	0	0	0	0	0.2	0.5	0.8	0.9	0.9	0.5	0.5	0	0	0
C4 : Type de route : Départementale	0	0	0	0	0.2	0.4	0.8	0.9	0.9	0.9	0	0	0	0	0
C4 : Type de route : Communale	0	0.4	0.7	0.8	0.9	0.9	0.7	0.4	0	0	0	0	0	0	0
C5 : Situation de conduite : Ville	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	0	0	0	0	0	0	0
C5 : Situation de conduite : Hors ville	0	0	0	0	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
C5 : Situation de conduite : Intersection	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0	0	0	0	0
C5 : Situation de conduite : Pas d'Intersection	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
C5 : Situation de conduite : Sortie d'Autoroute	0	0	0	0	0.5	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5
C5 : Situation de conduite : Pas de Sortie d'Autoroute	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
C6 : Mode Guidage Validé	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C6 : Mode Guidage Non Validé	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Tableau 4-3 : Masses de croyances de la navigation

Masses de croyance du système de vision

Le système de vision utilisé est un système de reconnaissance de panneaux de limitations de vitesse développé par Valeo pour les besoins d'un autre projet. Ce système permet de reconnaître les panneaux de limitations de vitesse et d'assigner un indice de confiance quantifiant la qualité de détection. L'idée, dans le cadre de la fusion de ce système avec la navigation, est d'utiliser les panneaux détectés pour renseigner et fiabiliser la détection de la situation et du contexte de conduite. Effectivement, l'information de vitesse réglementaire indiquée par la signalisation peut permettre de lever certaines ambiguïtés liées à l'utilisation d'une base de données cartographiques. Nous nous appuyons ici sur le fait que les niveaux de vitesse réglementaires dépendent principalement des contextes géographiques : zone urbaine, zone extra-urbaine, autoroutes, etc.

Les éléments focaux du dispositif de détection de panneaux ont été définis afin de tenir compte des cas de mauvaises détections liées à des erreurs d'analyse des caractères numériques. Lors d'une détection de vitesse de 90 km/h, la reconnaissance de caractère peut par exemple confondre le 9 avec un 8 ou un 6. Donc, les éléments focaux peuvent être par exemple 60, 80, 90. Dans un premier temps, la vision a été considérée comme capteur *leader*. Ainsi, un seul élément focal est pris en compte et celui-ci correspond à la limitation de vitesse donnée par la reconnaissance de panneaux de limitations de vitesse. La masse de croyance de cet élément focal est exploitée en tant qu'indice de confiance donné par la vision. Une incertitude de 0.1 a été assignée au système à base de caméra au moment de la détection d'un panneau. Cette incertitude a été fixée à 0.1 suite à des études statistiques de mauvaises détections. Cette incertitude augmente en fonction du temps, après la détection d'un panneau (augmentation de 0.1 toutes les 30 secondes jusqu'à 0.3). Ceci a été effectué pour prendre en compte le cas où le panneau considéré à un instant donné n'est valable que pour une section ponctuelle. Comme on ne peut pas connaître la situation et la validité de ce panneau au bout de quelques kilomètres, on augmente cette incertitude. En Allemagne, un panneau n'est valable que 2km après sa détection. L'utilisation de la vitesse du véhicule pourrait être envisagée dans ce cas pour calculer la distance parcourue et donc augmenter l'incertitude assignée à ce panneau en fonction de la distance.

4.3.5.3. Combinaison des connaissances

La règle de combinaison qui a été choisie dans ce travail est la règle de combinaison conjonctive de Dempster-Shafer présentée dans la section 3.4.3.3. Cette règle de combinaison permet de gérer les conflits à l'aide d'un facteur de normalisation k . Dans notre cas, l'hypothèse de monde fermé est vérifiée (ensemble de discernement exhaustif). Pour cette hypothèse, une masse non nulle de l'ensemble vide n'est pas acceptable [89]. La masse conflictuelle de l'ensemble vide doit être forcée à 0 et redistribuée sur toutes les autres masses. Ce qui conduit à normaliser les autres masses. La forme normalisée de la fonction de masse combinée pour tout $A \in 2^D$ est définie par :

$$\begin{cases} m(A) = \frac{1}{1-k} \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = A} \prod_{j=1}^m m_j(B_j), \text{ si } A \neq \emptyset \\ m(\emptyset) = 0 \end{cases} \quad \text{Équation 4-1}$$

où $k = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_m = \emptyset} \prod_{j=1}^m m_j(B_j) < 1$ est un facteur de normalisation.

Décision

La méthode de décision choisie est le maximum de crédibilité avec prise en compte d'un seuil en dessous duquel on ne valide pas la sortie de limitation de vitesse résultante. Ce seuil a été fixé à 0.6.

Des résultats de validation de ces deux capteurs sont présentés dans le chapitre 5. Ils ont notamment été utilisés en vue de l'optimisation de l'éclairage AFS dans le cadre du projet NAFS. La section suivante est consacrée à ce dernier aspect.

4.4. Applications à l'éclairage AFS

4.4.1. Introduction

Les deux capteurs virtuels développés dans le cadre de cette thèse sont appliqués dans cette section à l'optimisation de l'éclairage AFS. Cette optimisation concerne l'emploi des différentes fonctions d'éclairage TL, ML et FBL+DBL selon les situations de conduite rencontrées conformément aux stratégies d'éclairage identifiées (cf. §2.4.4). Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'emploi du capteur HGE pour l'éclairage AFS avant d'exploiter le capteur virtuel de détection de situations de conduite. Ces capteurs sont développés sur la base d'un système de navigation. Or, les systèmes de navigation automobile actuels s'appuient sur des données cartographiques et sur des moyens de localisation dont la précision générale est de 10 à 15m selon les régions. Cette précision est tout à fait adaptée aux exigences de l'aide à la navigation, notamment lorsqu'il s'agit d'avertir le conducteur d'un changement de direction avant un carrefour [49]. Néanmoins cette précision, fortement liée aux techniques de mesure GPS et à une résolution de la cartographie encore limitée, n'est pas suffisante dans le cas de la commande d'éclairage en courbe (FBL+DBL). Dans ce type d'applications, il convient de disposer d'une information de courbure pouvant garantir une commande fluide de l'éclairage. Néanmoins, les navigateurs actuels ne sont pas adaptés pour répondre à ces objectifs du fait de l'utilisation de techniques de calcul de la courbure très basiques [59]. La détermination de cette courbure par une autre méthode plus précise s'avère donc nécessaire.

Nous avons alors été amenés à développer une solution fondée sur un modèle mathématique continûment dérivable en position, vitesse et courbure à partir de l'identification événementielle effectuée en utilisant le capteur d'horizon glissant événementiel. Cette étude rentre dans le cadre de la problématique du suivi de trajectoire. Elle a commencé avec les travaux de DEA qui ont initié ce sujet de thèse [92] et dans lesquels plusieurs méthodes ont été étudiées : interpolation polynomiale, interpolation par splines, interpolations par polynômes polaires et les courbes de Bézier. La méthode retenue ici est celle des polynômes polaires, décrite dans la section 4.4.4.

Dans un premier temps une des hypothèses posées consiste à considérer que les moteurs des projecteurs pour la fonction DBL suivent fidèlement la trajectoire de consigne générée sans nécessité de boucle de retour. Les commandes décrites ici se font donc en boucle ouverte.

4.4.2. Eclairage AFS et capteur d'horizon glissant événementiel

L'approche proposée ici consiste à exploiter les informations événementielles relatives aux situations de conduite à rencontrer et fournies par le capteur HGE en vue d'une optimisation des fonctions d'éclairage AFS. La Figure 4-9 montre le schéma de la commande d'éclairage AFS basé uniquement sur le capteur virtuel HGE. Afin de définir les commandes d'éclairage appropriées à la situation de conduite considérée, cette solution utilise les données provenant du capteur virtuel pour connaître à l'avance la situation de conduite en amont du véhicule et assurer ainsi une commande anticipative selon la géométrie de la route. Les stratégies d'éclairage identifiées dans le §2.4.4 sont prises en compte dans cette commande.

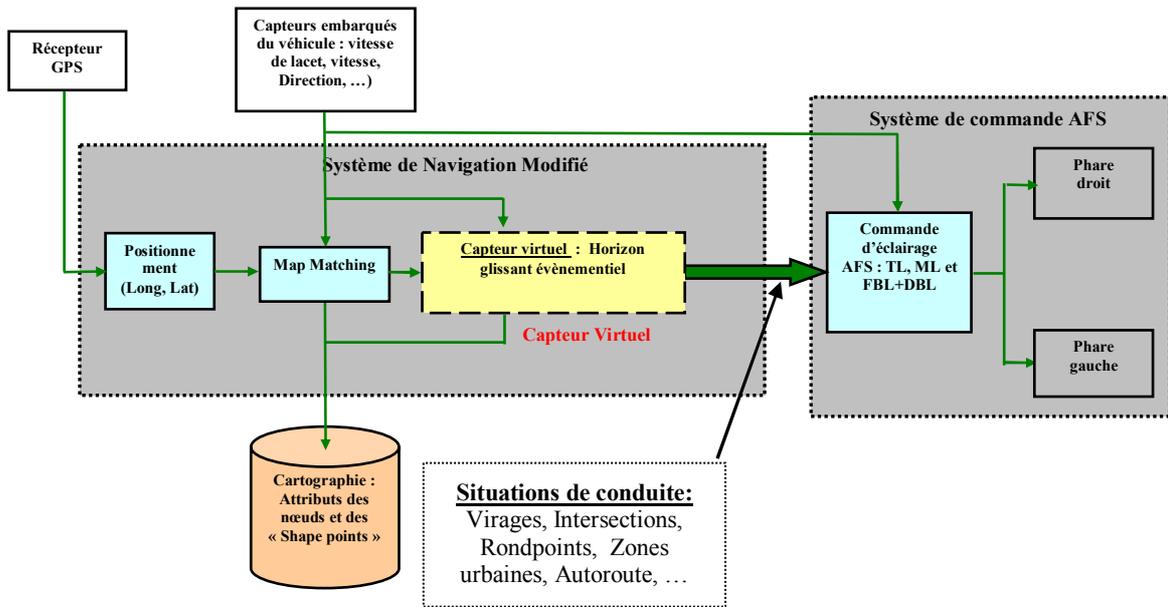


Figure 4-9 : Optimisation de la commande d'éclairage AFS utilisant le capteur virtuel d'horizon glissant événementiel

4.4.3. Eclairage AFS et capteur de détermination des situations de conduite

La Figure 4-10 montre le schéma de la commande d'éclairage AFS basé sur le capteur virtuel de détermination des situations de conduite présenté dans la section 4.3. Les situations de conduite définies par le capteur virtuel sont exploitées par le dispositif de commande de l'éclairage AFS. afin de connaître à l'avance la situation de conduite en amont du véhicule et assurer ainsi une commande anticipative et fluide.

La section suivante décrit le principe de commande mis en œuvre pour garantir le caractère anticipatif et fluide des fonctions d'éclairage recherchées.

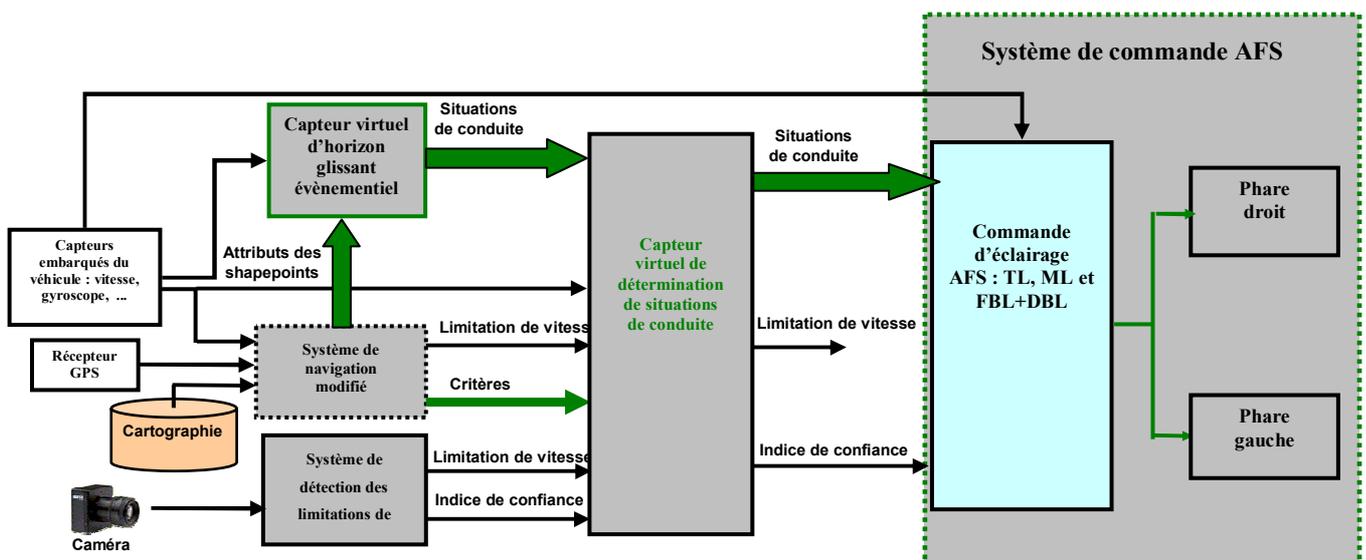


Figure 4-10 : Optimisation de la commande d'éclairage AFS utilisant le capteur de détermination des situations de conduite

4.4.4. Commande d'éclairage par suivi de trajectoires

Pour la commande d'éclairage en courbe, les fonctions d'éclairage utilisées sont les fonctions FBL et le DBL conjointement comme cela est défini dans le §2.4.3. Pour cet éclairage en courbe, il convient de disposer d'une information de courbure pouvant garantir une commande fluide de l'éclairage. Néanmoins, les navigateurs actuels ne sont pas adaptés pour répondre à ces objectifs du fait de l'utilisation de techniques de calcul de la courbure très basiques [59]. La détermination de cette courbure par une autre méthode plus précise s'avère donc nécessaire.

Nous avons alors été amenés à développer une solution fondée sur un modèle mathématique de trajectoire continûment dérivable en position, vitesse et courbure à partir de l'identification événementielle (détermination des portions de courbes...) effectuée au préalable. Une commande par « prévisualisation » est ensuite appliquée et a alors pour objectif d'asservir l'éclairage suivant cette trajectoire.

4.4.4.1. Nécessité d'un modèle à courbure continue

L'idée principale consiste à déterminer, en fonction des informations de navigation, une trajectoire de consigne utilisée pour la commande de l'éclairage. Cette approche s'apparente par conséquent à la problématique de planification et de suivi de trajectoire très largement abordée en robotique mobile [146]. A l'origine, la majorité des applications de planification ou de génération de trajectoire pour des robots de type voiture utilisait des segments de droite connectés tangentiellement à des arcs de cercle [140]. Cette solution a l'avantage de la facilité de calcul de la trajectoire. Néanmoins, elle souffre d'un inconvénient majeur qui est la discontinuité de la courbure aux points de jonction entre les segments de droite et les arcs de cercle. Cette discontinuité se traduit directement par une impossibilité de suivre de façon précise la trajectoire. Par la suite de nombreux travaux se sont intéressés à cet aspect et proposent des techniques basées sur l'interpolation par splines, par courbes de Bézier ou encore par polynômes polaires. C'est cette dernière méthode, introduite par Nelson [133], qui a été retenue ici. En effet, elle garantit d'une part une continuité de courbure à chaque instant permettant entre autres méthodes d'avoir une commande d'éclairage fluide, et d'autre part une détermination temps-réel de la consigne du fait de la simplicité des expressions mathématiques manipulées. Enfin, comme cela a été montré par Lauffenburger, les polynômes polaires permettent de générer des trajectoires de formes très différentes [51].

Les polynômes polaires sont définis par une fonction polynomiale décrivant le rayon de courbure en fonction de l'angle polaire. La Figure 4-11 représente le repère polaire. Les symboles sur cette figure sont présentés dans le Tableau 4-4.

Symbole	Désignation
R	Rayon de courbure du virage
α	Secteur angulaire du virage
r	Rayon polaire du virage
a_i	Paramètres du polynôme polaire
r'	Dérivée du rayon polaire par rapport à l'angle polaire
k	Courbure instantanée sur le virage
ϕ	Angle polaire
θ	Cap du véhicule

Tableau 4-4 : Symboles relatifs aux polynômes polaires

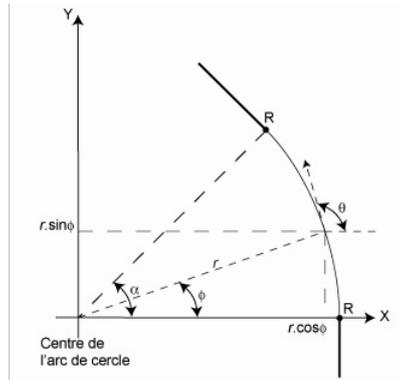


Figure 4-11 : Caractéristiques des courbes polaires

Ces polynômes possèdent une caractéristique importante par rapport aux objectifs de modélisation de trajectoires : le choix du polynôme et notamment son ordre dépendent des contraintes que l'utilisateur impose. Généralement, dans le cadre de la génération de trajectoires, celui-ci impose plusieurs configurations (points de passage, courbure en ces points...) afin de définir un polynôme interpolant les points de passage. C'est en agissant sur le nombre ou la valeur des contraintes de continuité imposées, que différentes configurations sont envisageables. L'équation générale des polynômes polaires est donnée par l'équation (Équation 3-45) où le nombre de paramètres a_i définissant le rayon polaire r comme une fonction de l'angle polaire ϕ dépend du nombre de conditions de continuité imposé :

$$r(\phi) = a_0 + a_1\phi + a_2\phi^2 + a_3\phi^3 + \dots + a_n\phi^n \quad \text{Équation 3-45}$$

Dans la solution proposée, Nelson a choisi d'imposer des conditions de continuité garantissant une courbure nulle entre les lignes droites et les virages [133] :

$$\begin{aligned} \text{pour } \phi = 0 &\Rightarrow r = R, r' = 0, k = 0 \\ \text{pour } \phi = \alpha &\Rightarrow r = R, r' = 0, k = 0 \end{aligned} \quad \text{Équation 3-46}$$

Ces contraintes définissent complètement l'expression d'un polynôme d'ordre 5. Néanmoins les conditions de courbure nulle ramènent la solution à un polynôme polaire d'ordre 4:

$$r(\phi) = R \left(1 + \frac{\phi^2}{2} - \frac{\phi^3}{\alpha} + \frac{\phi^4}{2\alpha^2} \right) \quad \text{Équation 3-47}$$

où : $a_0 = R, a_2 = R/2, a_3 = -R/\alpha, a_4 = R/2\alpha^2, a_5 = 0$

Un exemple utilisant cette méthode est illustré ci-dessous. En utilisant les points de la cartographie d'un virage obtenu par le système de navigation, une trajectoire a été générée. La Figure 4-12 présente les points fournis par le système de navigation ainsi que la trajectoire générée à partir du modèle mathématique précédemment décrit. Cette figure montre que le nombre des points dans le virage est faible et que leur distribution n'est pas constante. La génération de trajectoire permet d'obtenir une trajectoire suivant ces points en garantissant une détermination précise de la courbure.

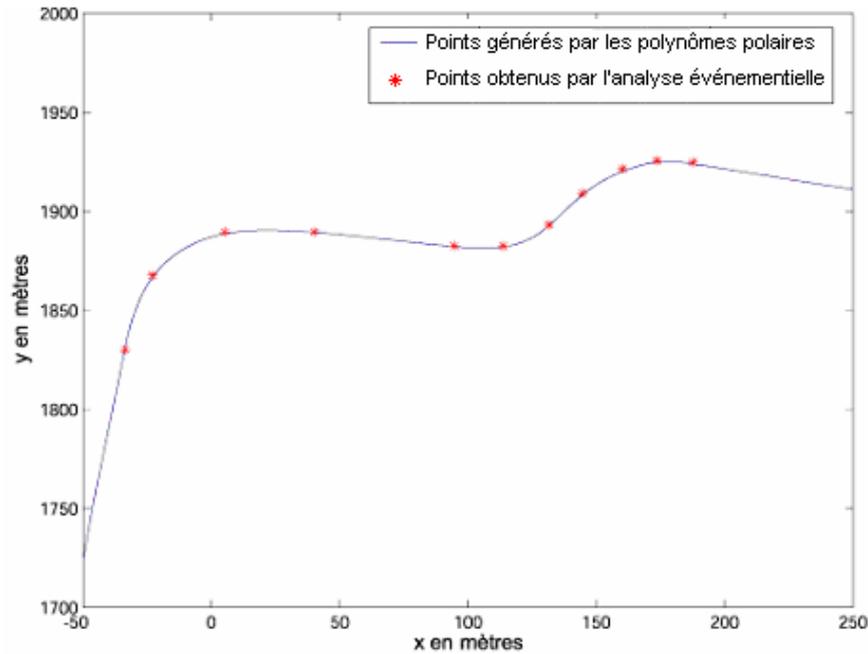


Figure 4-12 : Modèle trajectographique

4.4.4.2. Commande prédictive (« *Preview control* »)

L'aspect de commande de l'éclairage a été abordé par une approche couramment employée dans le domaine de la robotique mobile consistant à définir un chemin de référence qu'il s'agit ensuite de suivre. Différentes techniques ont été définies pour garantir le suivi d'une trajectoire de référence. En général, elles se basent sur une approche géométrique [100]. Celle-ci consiste à évaluer des écarts entre un point de référence du véhicule et la trajectoire en avant de celui-ci. Cette technique porte le nom de commande par « *preview* ». Cette commande est fondée sur un terme dépendant de la courbure (connue *a priori*) du trajet à suivre. L'information d'anticipation porte le nom de « *Preview signal* ». Dans cette optique Barton a montré, à l'aide de simulations, pour des trajectoires à courbure continue que les contrôleurs intégrant une information de « *preview* » fournissent de bien meilleurs résultats que les commandes « *feedback* » [87].

Dans le même objectif d'anticiper le profil routier et fournir une meilleure aide au conducteur, l'information de courbure du virage en amont du véhicule a été utilisée dans le cadre de notre étude. Ceci laisse au conducteur une marge de sécurité afin de réagir face à d'éventuels obstacles. La courbure est utilisée comme information de « *preview* » pour la commande « *preview control* » des phares en boucle ouverte. La Figure 4-13 montre le schéma bloc de la commande en boucle ouverte de l'éclairage en courbe. L'information de courbure définie par le modèle de trajectoire est fournie au bloc de commande par « *preview* ». L'horizon de prédiction dans cette commande est variable et dépend du concept de l'horizon électronique, de l'analyse événementielle des situations de conduite et de la dynamique du véhicule. La fonction non linéaire, développée à Valeo, est une loi de commande non linéaire qui consiste à transformer cette information en une commande de pilotage des moteurs des phares pour la fonction DBL.

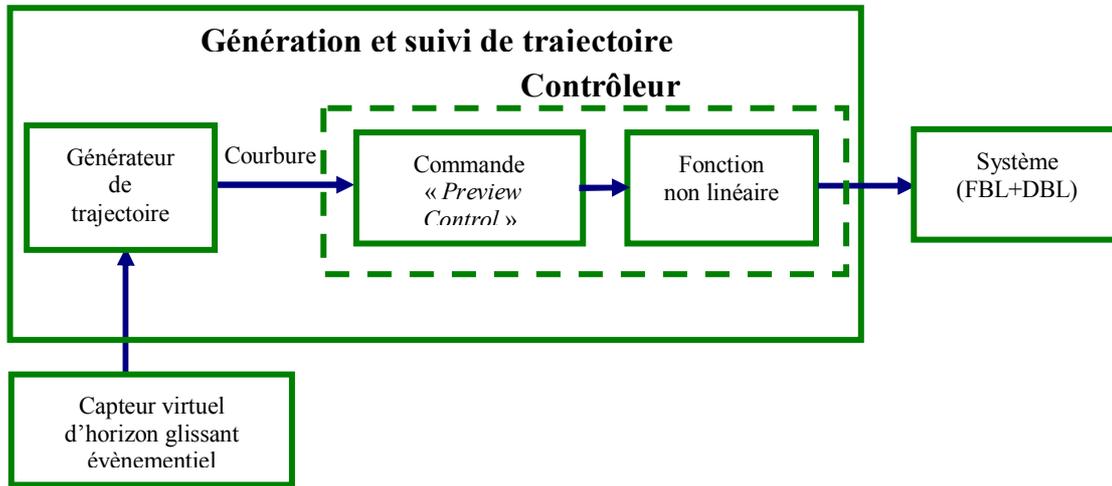


Figure 4-13 : Commande en boucle ouverte de l'éclairage en courbe

4.5. Conclusion

L'anticipation est primordiale pour l'amélioration de l'éclairage et pour les systèmes d'aide à la conduite en général. Pour le projet NAFS, l'anticipation des situations de conduite en amont du véhicule permet d'optimiser l'éclairage et le rendre prédictif afin d'éviter d'éventuels obstacles en temps utile. L'approche décrite dans ce chapitre concerne l'utilisation de deux capteurs (une caméra et un système de navigation) permettant d'obtenir des informations différentes sur la scène de conduite. Ces deux systèmes, utilisés indépendamment, ont des limitations ne permettant pas d'aboutir aux objectifs de perception et d'assistance active recherchés dans ces travaux. Pour pallier à ces limitations, le concept de capteur virtuel a été retenu. Un capteur virtuel permet d'extraire, à partir des informations disponibles, des informations qui ne sont pas mesurables directement ou qui requièrent des capteurs coûteux [25].

La nature ponctuelle des informations contenues dans une cartographie de SIG constitue un inconvénient majeur dans l'analyse du contexte de conduite. Les attributs liés aux points de la cartographie ne permettent pas d'avoir une vue globale des situations de conduite. C'est pourquoi, nous proposons la mise en œuvre d'un capteur virtuel basé sur une analyse événementielle de l'horizon électronique par un automate d'états finis. Ce capteur permet de définir les différentes situations de conduite auxquelles le conducteur aura à faire face.

Ce chapitre décrit également un deuxième capteur virtuel développé à partir de la fusion des informations du système de navigation et d'un système de détection des panneaux de limitations de vitesse. Pour cette fusion, la théorie des croyances a été utilisée. Ce choix a été motivé par sa capacité à modéliser les incertitudes et les imprécisions des informations, sa capacité à modéliser l'ignorance et finalement sa souplesse dans la gestion des conflits entre les sources d'informations.

Ces deux capteurs virtuels ont été utilisés pour l'optimisation de l'éclairage AFS. Les résultats de simulations et d'essais réels sur un véhicule équipé seront détaillés dans le chapitre suivant.

5. Chapitre 5 : Mise en œuvre expérimentale et résultats

5.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de validation des capteurs virtuels développés dans le chapitre 4. La validation a été effectuée en simulation (*Simulation In the Loop, SIL*), en simulation considérant la contrainte temps-réel, en simulation HIL (*Hardware In the Loop*) et en conditions réelles sur un véhicule expérimental. Les deux dernières procédures de validation (HIL et conditions réelles) ont nécessité l'équipement d'un véhicule d'essais spécialement dédié à ce projet et qui, par la suite, a été exploité pour d'autres projets au sein de Valeo. Ce véhicule est devenu un véhicule de démonstration nommé « OptiVeo ». L'optimisation des lois de commande d'éclairage AFS a été validée sur routes ouvertes avec considération des situations et contextes de conduite identifiés dans le chapitre 2 (lignes droites, virages, intersections, ronds-points, ...).

Ce chapitre présente dans un premier temps, la méthodologie de validation suivie, à savoir le cycle en V. Dans un deuxième temps, la description du véhicule expérimental est détaillée en discriminant les parties logicielle et matérielle. Ensuite, les résultats des différents capteurs virtuels développés ainsi que leur application à l'optimisation des lois de commande d'éclairage AFS sont présentés. Finalement, l'intérêt de ces travaux est montré par leur généralisation à d'autres applications ADAS et notamment à une assistance à la détection des limitations de vitesses réglementaires SLS (*Speed Limit Support*). Ces résultats illustrent l'intérêt de la démarche d'accroissement de la perception du conducteur et laissent entrevoir de nombreuses applications visant à accroître la sécurité de conduite.

5.2. Méthodologie : cycle en V

La conception d'un système automatisé pose un grand nombre de problèmes matériels et logiciels. Elle nécessite l'implantation d'algorithmes complexes sur des architectures matérielles souvent distribuées et hétérogènes. Pour la gestion de cette complexité, les méthodes de développement sont généralement basées sur un principe de hiérarchisation permettant de décrire le système comme un ensemble de sous-systèmes plus simples et donc plus faciles à concevoir [167]. Ceci impose la définition complète des fonctions et sous systèmes ainsi que leurs interactions générales. Pour ce développement, il existe plusieurs modèles : cycle en cascade, cycle en V, cycle par incrément, cycle en spirale, etc. Néanmoins, le modèle de conception le plus utilisé actuellement demeure le cycle en V. Ce modèle est convenable pour les projets complexes [159]. Ce modèle a été dérivé du modèle en cascade afin de pallier au problème de réactivité de ce dernier. Le cycle en V permet, en cas d'anomalie, de limiter les retours aux étapes précédentes. Lorsqu'un défaut est détecté, les phases de la partie montante (de l'implémentation à l'intégration embarquée) doivent renvoyer des informations aux phases de la partie descendante en vis-à-vis afin d'améliorer le système (cf. Figure 5-1).

Le principe de ce modèle, est que chaque étape de décomposition du système possède une phase de test associée. La démarche itérative ainsi suivie permet de converger vers une solution technique correspondant aux attentes finales. Dans le domaine automobile, le processus de développement traditionnel par cycle en V n'intègre généralement pas la sûreté de fonctionnement dans ses étapes. C'est pourquoi un cycle en V incluant cet aspect a été récemment proposé dans [158] et [163].

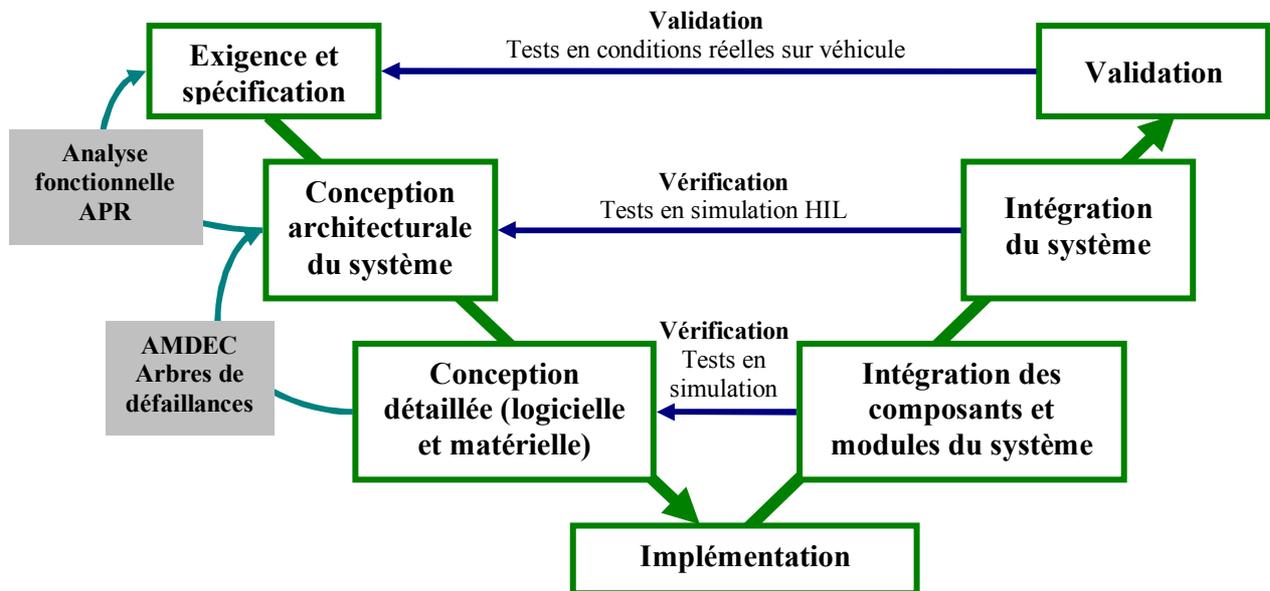


Figure 5-1 : Phases du cycle en V incluant la sûreté de fonctionnement

Les étapes décrites dans ce cycle sont les suivantes (cf. Figure 5-1) :

- Exigence et spécification : description « haut niveau » du système. Elle consiste en la récupération des besoins et de leur spécification précise. Elle s'appuie uniquement sur la description des besoins du client. Elle permet de décrire les algorithmes, et les contraintes d'implémentation qui concrétisent de manière logicielle ces besoins ;
- Conception architecturale du système : définition de l'architecture du système. Pendant cette phase une analyse fonctionnelle du système ainsi qu'une analyse préliminaire des risques (APR) sont effectuées (cf. Annexe). Cette phase a pour objectif de définir les risques majeurs ;
- Conception détaillée des fonctions logicielles et matérielles : conception des sous-systèmes (modules ou composants) du système global. Pendant cette phase une analyse des modes de défaillance et de leurs modes de criticité (AMDEC) ainsi que des arbres de défaillances des événements redoutés de grande sévérité sont faits (cf. Annexe) ;
- Implémentation du système (logicielle et matérielle) : elle consiste d'une part à développer les programmes logiciels qui doivent s'exécuter sur l'architecture matérielle, et d'autre part à concevoir les systèmes matériels [167] ;
- Intégration des composants et modules du système : première étape de validation qui consiste en des tests en simulation. Elle est souvent longue et fastidieuse. Il s'agit de s'assurer que toutes les fonctions qui implémentent les algorithmes des modules du système fonctionnent correctement conformément à la spécification. [167] ;
- Intégration du système : lorsque toutes les fonctions ont été déboguées et validées séparément, on vérifie, pendant cette étape, que l'ensemble des fonctions se comporte comme défini dans la spécification. Elle consiste à la fois en des simulations de l'ensemble des fonctions et en une intégration matérielle. Des tests de vérification par simulations HIL (*Hardware In the Loop*) sont menés à ce stade du développement ;
- Validation : la validation finale consiste à vérifier que le comportement de l'application est conforme au cahier des charges. Elle consiste à faire des tests de vérification et de validation sur un véhicule expérimental.

La méthodologie décrite ci-dessus a été prise en considération pendant le développement des assistances présentées dans ce chapitre. En suivant les étapes de ce cycle en V, des vérifications sont faites, à chaque étape, en simulation et en temps-réel simulé avant de passer aux simulations HIL puis à la validation en conditions réelles.

5.3. Environnement de simulation

Les travaux présentés dans ce mémoire s'appuient sur l'environnement ADASRP (Version 3.8 et 2006.2.11) développé par la société NAVTEQ. La version 3.8 [59] a été utilisée au début de la thèse pour le développement du capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel. Par la suite, la version 2006 2.11 [60] a été utilisée notamment lors du développement du capteur de détermination de situations de conduite.

Enfin, la fusion des informations d'ADASRP et du système à base de caméra, pour le développement du capteur virtuel de détermination de situations de conduite, a été réalisée à l'aide du logiciel ^{RT}Maps[®] de la société Intempora [161]. Cet outil permet l'acquisition et la fusion des données à haut débit en temps-réel. Il permet de connecter facilement tout type de capteurs et actionneurs, d'acquérir, de traiter et de transmettre toute donnée en temps-réel [161].

Les lois de commande de l'éclairage AFS ont, quant à elles, été implémentées en utilisant Matlab/Simulink et la toolbox Stateflow [162].

Les figures Figure 5-2 et Figure 5-3 présentent les capteurs virtuels et aides à la conduite (NAFS et SLS) développés dans cette thèse ainsi que les outils logiciels sur lesquels s'appuient ces différents développements.

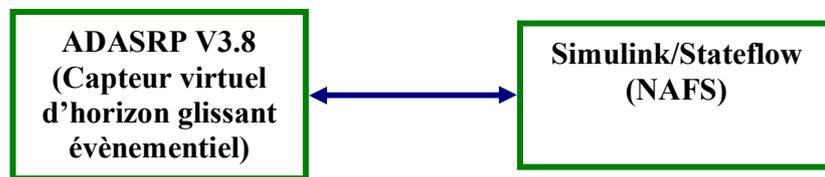


Figure 5-2 : Environnement de simulation pour le capteur virtuel HGE

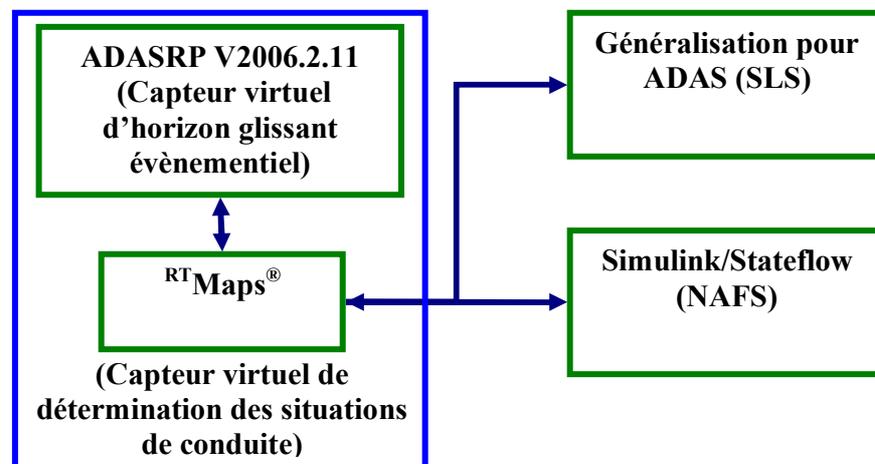


Figure 5-3 : Environnement de simulation pour le capteur virtuel de détermination de situations de conduite

5.3.1. ADASRP

Le système de navigation ADASRP (*Advanced Driver Assistance Systems Research Platform*) est une application destinée au développement d'assistances à la conduite et permettant aux concepteurs d'accéder facilement aux données liées à la cartographie routière. Il entend donner un accès complet aux données cartographiques pertinentes (géométrie de la route, attributs de la base de données, etc.), contrairement aux systèmes de navigation classiques qui sont autonomes et fermés. La Figure 5-4 présente l'interface graphique de la version 3.8.

Le développeur peut ainsi [59] :

- Choisir les paramètres de fonctionnement d'ADASRP.
- Créer un module logiciel ADASRP qui récupère continuellement les dernières valeurs des données cartographiques en fonction de la position du véhicule.
- Interfacer ce module avec le bus de données du véhicule pour pouvoir transmettre les données cartographiques à une application déportée.
- Tester des applications qui utilisent le positionnement ADASRP directement à bord du véhicule.
- Enregistrer des données pendant les tests pour pouvoir les réutiliser en laboratoire, en simulation par exemple.

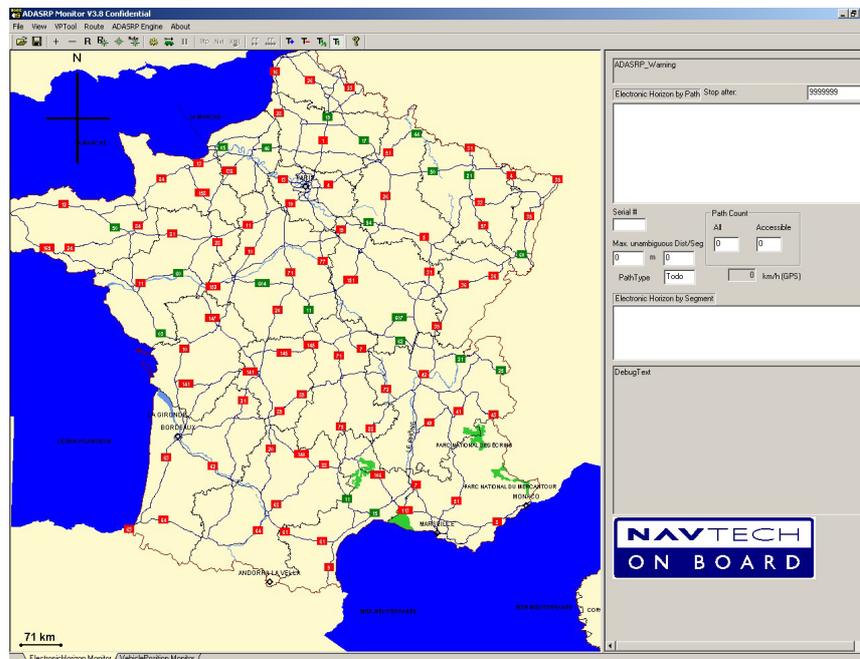


Figure 5-4 : Interface graphique (ADASMonitor) d'ADASRP V3.8

5.3.1.1. Architecture d'ADASRP

La Figure 5-5 décrit la structure d'ADASRP. Cet outil se compose d'une partie logicielle et d'une partie matérielle (*SensorBox*). La *SensorBox* est un dispositif de positionnement constitué entre autres d'un GPS et d'un gyroscope vibrant dont les performances sont identiques aux capteurs actuellement employés dans les systèmes de navigation disponibles sur le marché. Ce composant matériel permet d'utiliser des données réelles lors des validations des développements effectués. La partie logicielle est composée d'une base de données SDAL⁴⁵ et éventuellement d'une base de données complémentaires *Look-a-Side* configurable selon les besoins de l'utilisateur. Cette dernière peut être créée par NAVTEQ selon les besoins de l'utilisateur afin par exemple de décrire plus précisément le tracé d'une piste d'essais. La partie logicielle contient également l'API⁴⁶ NavTools constituant une bibliothèque de routines pour le positionnement du véhicule, l'affichage de la carte ou le calcul d'itinéraire. Pour obtenir un positionnement précis du véhicule, ADASRP effectue une fusion des mesures du GPS ainsi que des données du gyroscope et de la vitesse du véhicule. C'est à partir de ce positionnement et des cartographies disponibles que le dispositif détermine les caractéristiques du profil routier en amont du véhicule. Malheureusement, les NavTools ne peuvent être modifiés par l'utilisateur par exemple pour intégrer ses propres algorithmes de positionnement puisque ce module est fourni sous forme de bibliothèque compilée.

⁴⁵ SDAL : *Shared Data Access Library*. Le format SDAL est un format standardisé pour les cartographies routières.

⁴⁶ API : *Application Programming Interface*.

L'utilisation d'ADASRP pour le développement d'applications d'aide à la conduite nécessite l'écriture d'un *Listener* se chargeant de récupérer les informations pertinentes dans la base de données pour l'application d'aide à la conduite visée. Ce développement se fait sous Microsoft Visual C++.

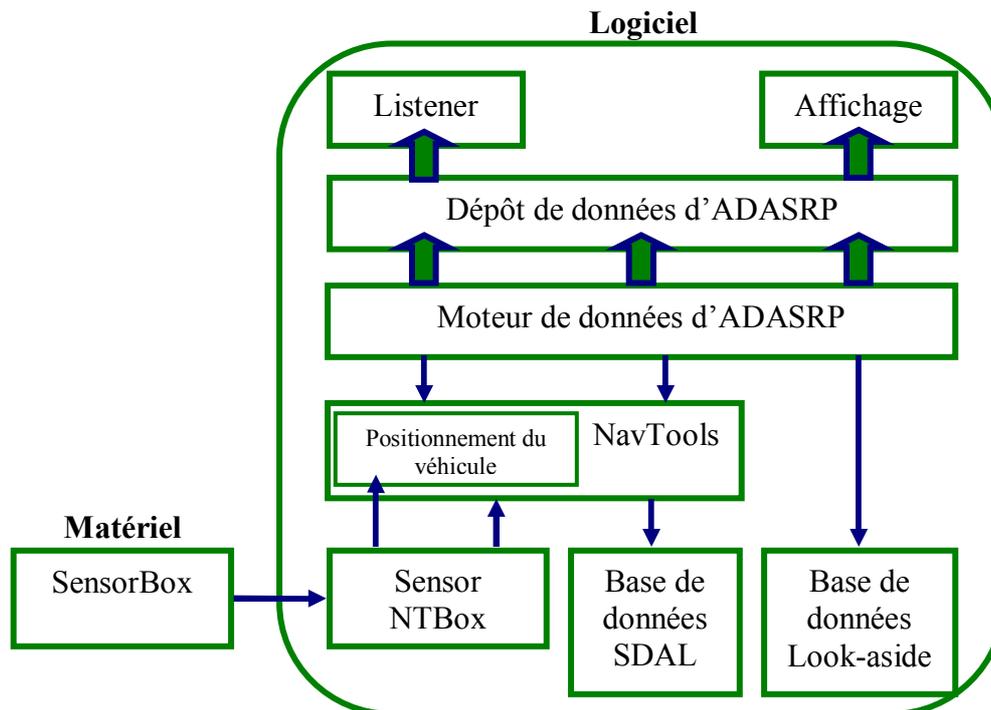


Figure 5-5 : Architecture d'ADASRP

5.3.1.2. Centrale de mesure *SensorBox*

C'est la partie matérielle d'ADASRP (cf. Figure 5-6) qui acquiert et sort les données des capteurs pouvant être utilisées par les NavTools pour la détermination de la position du véhicule. Elle contient :

- Un récepteur GPS Trimble Lassen SK-8.
- Un gyroscope piézo-électrique.
- Des entrées du véhicule (odomètre, marche arrière).
- Des ports analogiques.
- Un capteur de température.
- Un microprocesseur.

Le microprocesseur acquiert les données de tous les capteurs, il détermine et envoie, selon les instants d'échantillonnage, l'information à travers un port série RS232.



Figure 5-6 : Centrale de mesure *SensorBox* d'ADASRP (Extrait de [59])

5.3.2. ^{RT}Maps[®]

5.3.2.1. Spécificités et intérêts

^{RT}Maps[®] est un logiciel développé par la société Intempora [161] et issu des recherches du Centre de Robotique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Il permet l'enregistrement daté, le traitement et le rejeu de données. La datation des données, qui représente la spécificité de ce produit, en fait un outil très adapté aux contraintes de temps. Le traitement des données peut se faire au moyen de l'un des nombreux algorithmes disponibles. Le rejeu des données transformées permet alors de visualiser directement l'effet des algorithmes utilisés. ^{RT}Maps[®] est un outil particulièrement adapté aux applications d'acquisition/restitution de données datées et synchronisées provenant d'un système multicapteurs haut-débit (capteurs vidéo mono ou stéréoscopique, entrées audio, capteurs sur bus CAN, radars, télémètres, capteurs de localisation, etc.).

Les fonctions assurées par ^{RT}MAPS[®] sont les suivantes :

- **Gestion du temps** : le fonctionnement se fait en temps réel pour l'acquisition. En revanche, en cas de rejeu sur une, le noyau peut adapter automatiquement la base de temps.
- **Gestion des flux de données** : toutes les données numériques peuvent être manipulées par ^{RT}Maps[®]. Toutes les données sont datées avec précision à l'instant où elles entrent dans le système. Elles peuvent ainsi être enregistrées dans une base de données avec leur date exacte d'arrivée et donc d'être rejouées en préservant parfaitement leur synchronisation initiale.
- **Fonctions d'acquisition sophistiquées** : l'acquisition peut être commandée par un opérateur mais il est également possible de définir des événements qui déclencheront ou arrêteront l'acquisition. Un mode d'enregistrement similaire à celui d'une boîte noire est également envisageable.
- **Génération d'indicateurs de performance** : le système publie en permanence une série d'indicateurs de performance relevés sur tous les modules. Ceux-ci permettent d'optimiser et de valider une application.
- **Gestion d'une base de données** : celle-ci est d'un format ouvert, adapté aux contraintes de performance. Tous les flux de données peuvent y être enregistrés, au moins dans un format brut.
- **Montage de bases de données** : ceci permet de manipuler les données d'une ou plusieurs bases, afin de les monter ou de les mixer vers une nouvelle base.

5.3.2.2. Utilisation pratique

^{RT}Maps[®] est une plateforme basée sur la notion de composants s'échangeant des informations. Un composant est un module utilisé pour acquérir, traiter ou visualiser l'information. Le comportement d'un composant peut être modifié en paramétrant ses propriétés (valeurs de seuils, intervalles...).

Un diagramme est un ensemble de composants reliés entre eux par un jeu de connexions.

La fenêtre principale de ^{RT}Maps[®] est composée de cinq zones (cf. Figure 5-7) :

1. La fenêtre appelée *Diagram window* est l'endroit où l'on construit les diagrammes. C'est dans cette fenêtre qu'on place les composants, définit leurs propriétés et les relie par des connexions.
2. La fenêtre *Wide view* est utilisée pour la navigation dans un diagramme.
3. La fenêtre *Available components* décrit les bibliothèques de composants de l'environnement ^{RT}Maps[®].
4. La console affiche les messages (d'information, d'alerte et d'erreur, ...) retournés par ^{RT}Maps[®].
5. Le VCR permet de contrôler l'exécution d'un programme.

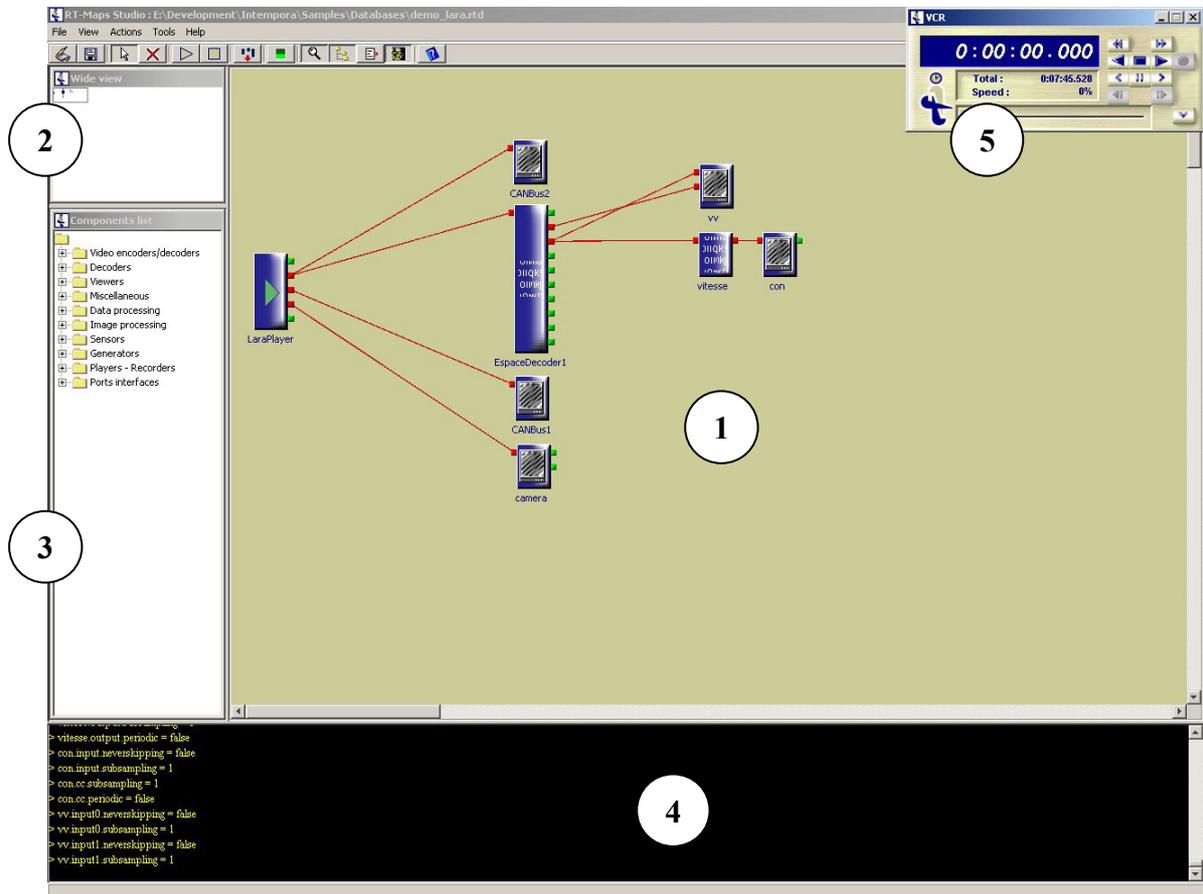


Figure 5-7 : L'environnement ^{RT}Maps®

5.4. Le véhicule expérimental : « OptiVeo »

Cette thèse a fait l'objet de l'instrumentation d'un véhicule d'essais destiné à la validation des développements. Si dans un premier temps, il n'était destiné qu'à l'optimisation des lois de commande d'éclairage, il est rapidement devenu un véhicule de démonstration des activités de Valeo. Ainsi la VOLVO S80 « OptiVeo » présente entre autres le système NAFS, le *LaneVue* (système de surveillance de trajectoire latérale prévenant tout changement de voie non intentionnel) et le SLS. La Figure 5-8 montre le véhicule de démonstration « OptiVeo » de Valeo.

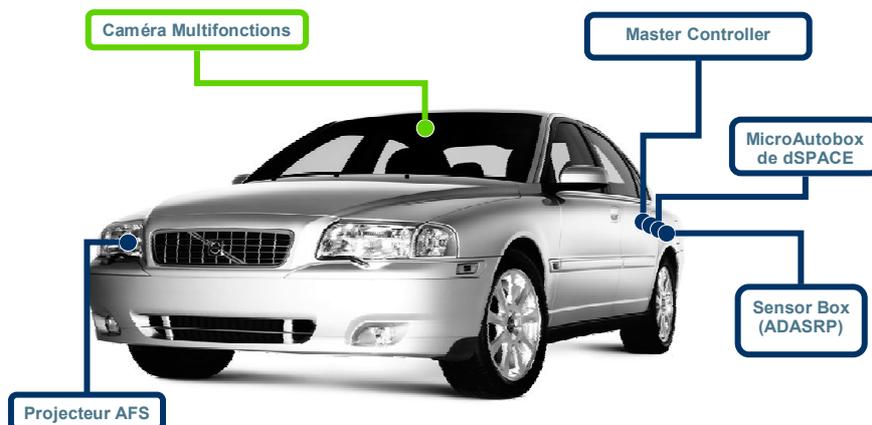


Figure 5-8 : Véhicule de démonstration « OptiVeo »

5.4.1. Instrumentation

La Figure 5-9 décrit les composants spécifiques au projet NAFS mis en œuvre sur le véhicule expérimental. Cette instrumentation est constituée de :

- Master Controller : PC industriel pour l'acquisition de la caméra, de la navigation et pour le traitement et l'envoi des commandes vers le MicroAutobox. Il est aussi utilisé pour la visualisation et le suivi de l'évolution des algorithmes.
- MicroAutobox : plateforme de prototypage rapide temps-réel de la société dSPACE [160] assurant l'exécution des commandes d'éclairage préalablement développées sous Simulink. Son interfacement avec le bus CAN du véhicule a été également réalisé. Cette plateforme est utilisée pour l'optimisation de l'éclairage AFS en simulations HIL et en conditions réelles.
- Projecteurs AFS : de nouveaux projecteurs contenant des optiques orientables Bi-Xénon et des lampes halogènes FBL ont été intégrés. Les FBL sont également utilisées pour assurer la fonction TL (*Town Lighting*) en allumant les deux FBL (droit et gauche) simultanément à 100% d'intensité. Les optiques Bi-Xénon assurent la fonction DBL (*Dynamic Bending Light*) par le déplacement horizontal et la fonction ML (*Motorway Lighting*) par leur déplacement vertical.
- Caméra multifonctions : utilisée notamment pour la détection des panneaux de signalisation dans le cadre de l'assistance SLS.
- Centrale de mesure *SensorBox* : partie matérielle du système de navigation ADASRP.

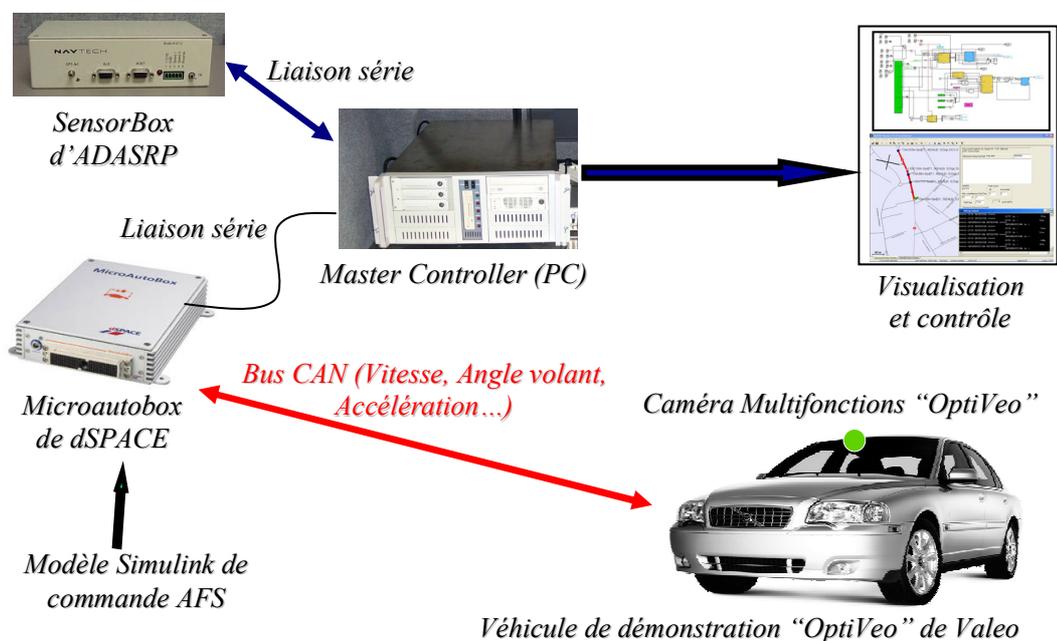


Figure 5-9 : Instrumentation du véhicule de démonstration « OptiVeo »

La Figure 5-10 présente l'instrumentation du coffre du véhicule expérimental et la Figure 5-11 montre le projecteur AFS droit composé d'un optique Bi – Xénon et d'une lampe halogène FBL.



Figure 5-10 : Coffre du véhicule de démonstration « OptiVeo »

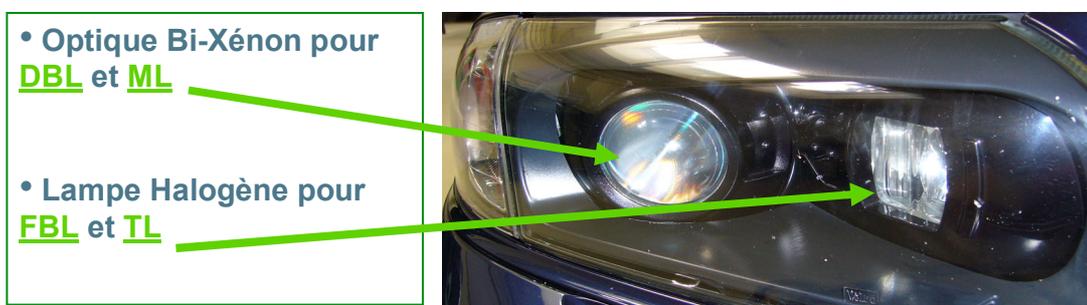


Figure 5-11 : Projecteur AFS droit (Optique Bi – Xénon + Lampe FBL)

5.4.2. Aspect logiciel

La Figure 5-12 décrit les interfaces logicielles mises en œuvre entre les différents composants du projet NAFS. La partie logicielle utilisée pour l'acquisition des images de la caméra est ^{RT}Maps[®]. Pour l'envoi des données des capteurs virtuels vers le modèle de commande de l'éclairage AFS exécutés sur le MicroAutobox, nous avons exploité la liaison série RS232 destinée à charger les modèles dans le MicroAutobox. Ainsi, une couche de communication a été développée dans ADASRP et dans ^{RT}Maps[®] en utilisant les bibliothèques *CLIB* de dSPACE. Ceci nous permet d'envoyer les données de nos applications (capteurs virtuels), développées sur ADASRP et ^{RT}Maps[®], vers le modèle de commande de l'éclairage AFS. Enfin, la communication entre ADASRP et ^{RT}Maps[®] nécessaire pour la fusion de la navigation avec la vision (capteur virtuel de détermination de situations de conduite) est basée sur l'utilisation des serveurs COM/DCOM.

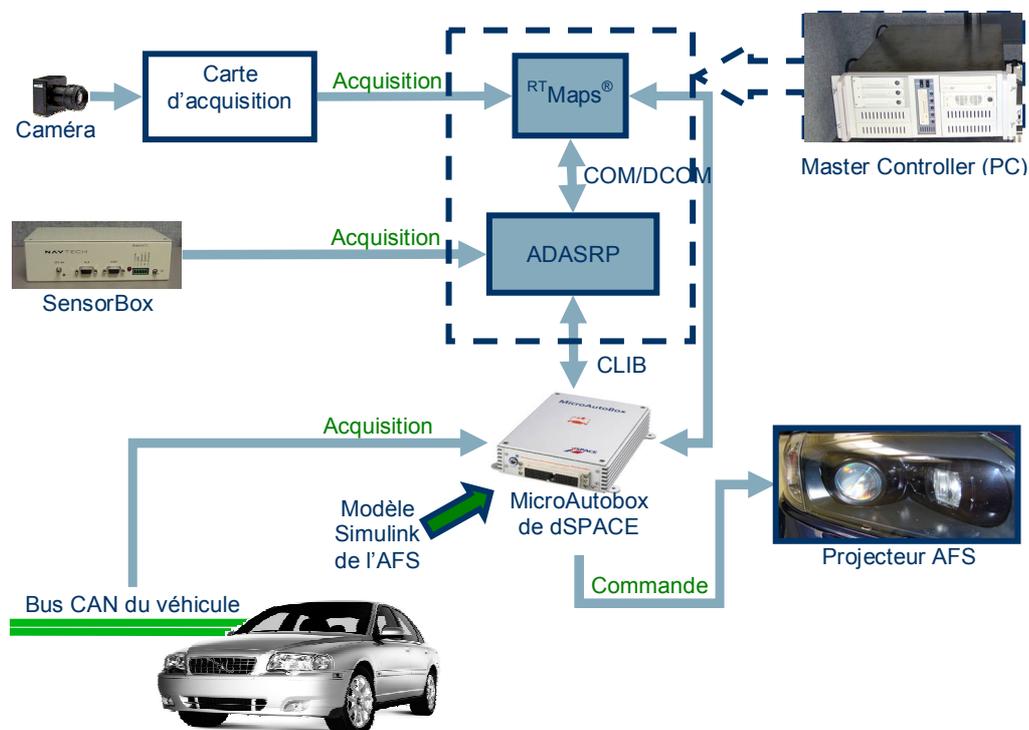


Figure 5-12 : Architecture matérielle/logicielle d'acquisition et de commande

5.5. Résultats des capteurs virtuels développés

5.5.1. Résultats du capteur d'Horizon Glissant Evènementiel

Cette section a pour objectif d'effectuer une comparaison entre le capteur HGE et le principe d'extraction des données classiquement employé, i. e. une extraction ponctuelle des informations de la cartographie. L'exemple illustré ci-dessous concerne une situation de conduite dans un contexte autoroutier aux alentours de l'agglomération mulhousienne (cf. Figure 5-13). La portion d'autoroute choisie pour cette simulation est matérialisée par les drapeaux symbolisant le début et la fin de cette section. Après la définition du point de départ et d'arrivée par l'utilisateur du logiciel, ADASRP détermine (selon des critères configurables) le meilleur chemin pour se rendre d'un point à l'autre.

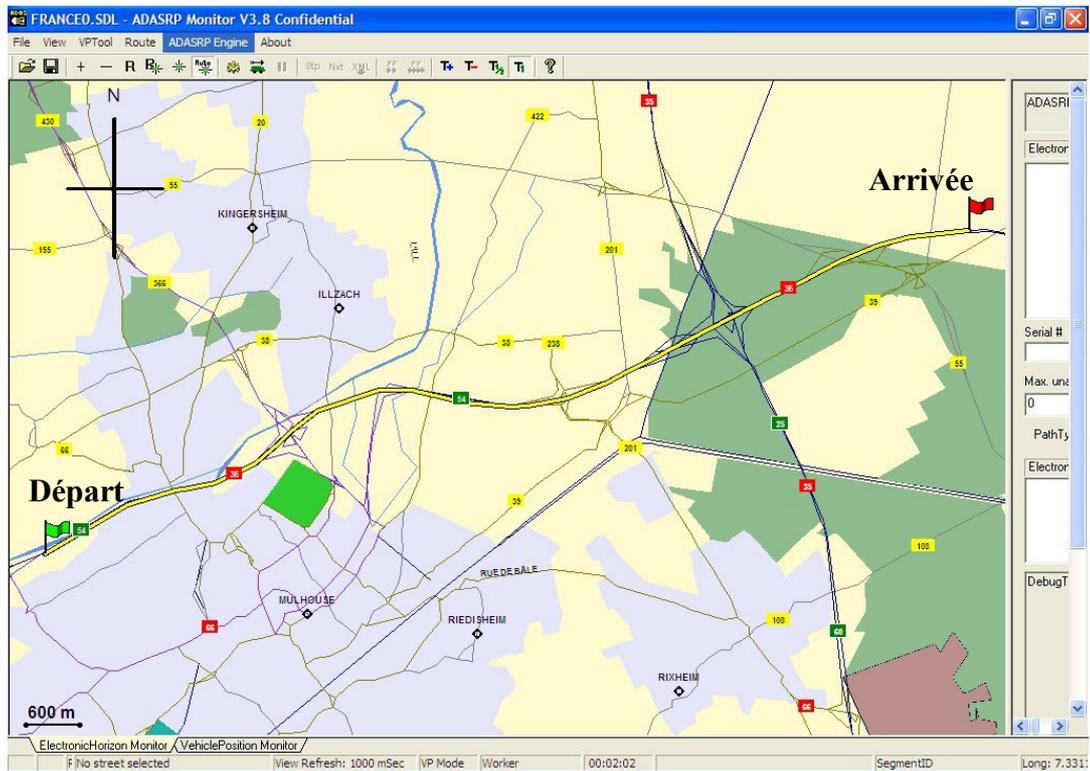


Figure 5-13 : Itinéraire de simulation sur Autoroute

Le résultat d'extraction des différents attributs de la cartographie routière s'affiche au fur et à mesure de la simulation sur l'écran de console (*Debug Output* sur les figures Figure 5-14 et Figure 5-15). Les figures Figure 5-14 et Figure 5-15 présentent respectivement les résultats obtenus avec une approche ponctuelle et avec le capteur d'horizon électronique événementiel. Lors de la simulation, l'ensemble des chemins accessibles au véhicule (triangle de couleur rouge) est matérialisée par une zone rouge. Cet exemple est particulièrement intéressant pour illustrer l'intérêt du capteur HGE et pour l'assistance NAFS. En effet, une partie de la section choisie se situe dans l'agglomération mulhousienne (cf. Figure 5-13), selon les attributs de la cartographie. Or, par définition, les fonctions d'éclairage TL et ML ne doivent pas être utilisées simultanément. L'utilisation d'un système ponctuel se traduit par une détection alternée des attributs *Motorway* et *City* (cf. Figure 5-14) pour l'ensemble des points situés dans l'horizon électronique, sans connaissance précise des propriétés de la situation (début, fin...). Dans le cadre de l'application NAFS, ceci se traduirait par l'utilisation alternée des fonctions d'éclairage ML et TL à chaque nouvelle analyse des attributs des points de l'HE.

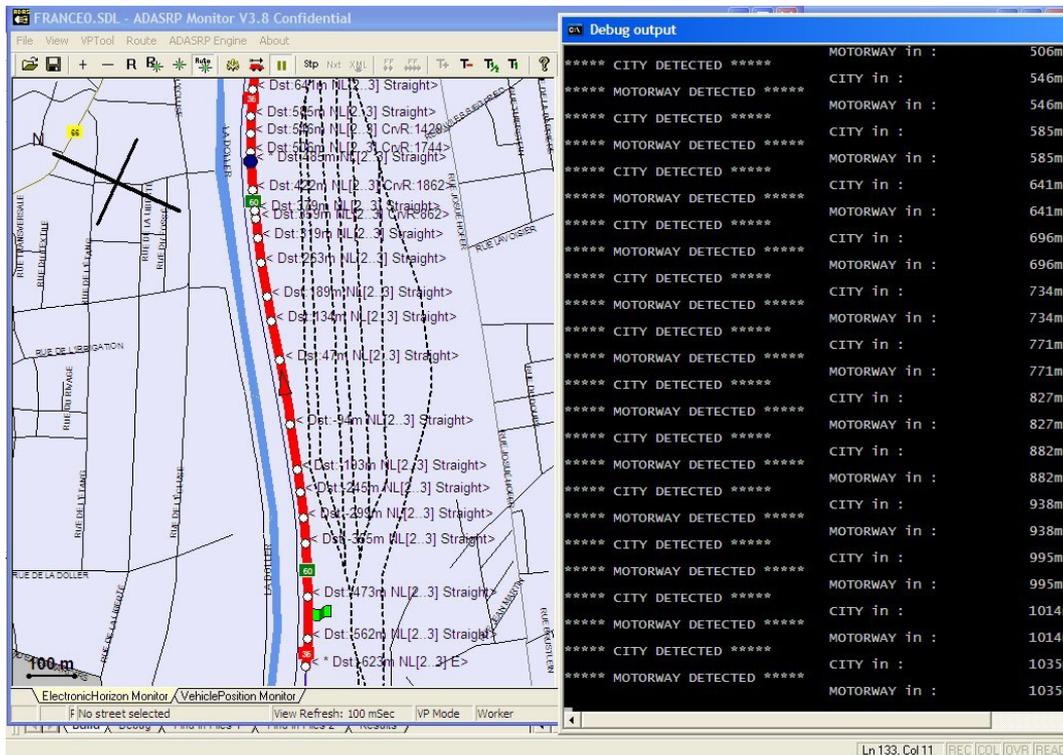


Figure 5-14 : Résultats de simulation du capteur d'horizon électronique ponctuel

Pour le capteur d'horizon glissant événementiel (cf. Figure 5-15), les résultats montrent qu'à l'intérieur d'un même horizon glissant, les situations et les contextes de conduite sont clairement identifiés et délimités (distance entre le véhicule et le début, et distance entre le véhicule et la fin de la situation considérée). Dans ce cas, on peut par exemple choisir dès le départ d'activer l'éclairage ML et de ne basculer vers un éclairage urbain (TL) que lorsque le véhicule aura quitté l'autoroute pour entrer réellement dans l'agglomération.

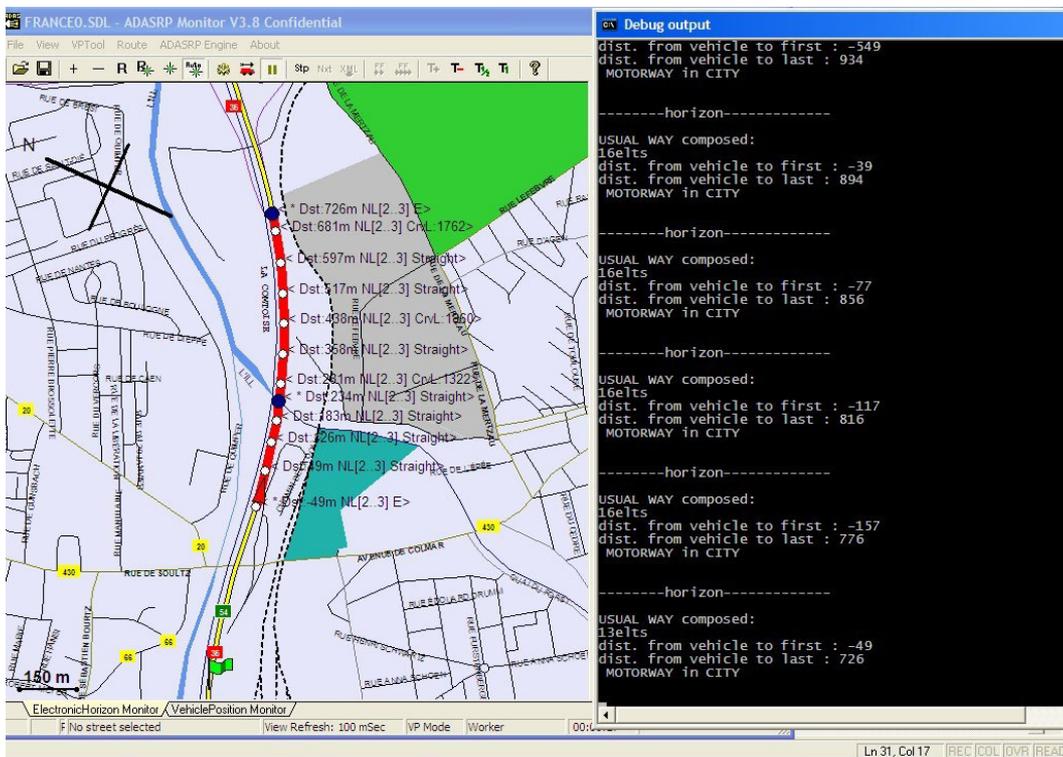


Figure 5-15 : Résultats de simulation du capteur d'horizon glissant événementiel

5.5.2. Performances du capteur de détermination des situations de conduite

Dans un premier temps, un simulateur a été réalisé sur ^{RT}Maps[®] pour simuler les données du système de navigation ADASRP (Limitation de vitesse, indice de confiance du GPS (*Most Likely Candidate Probability*) et les différents critères détaillés dans le chapitre 4) et les données du système de détection de panneaux de limitations de vitesse par vision. L'aspect temps-réel a été primordial dans le cadre des développements de ce capteur de détermination des situations de conduite.

Nous présenterons, dans cette section, deux cas d'utilisation du capteur virtuel de détection de situations de conduite. La première simulation se rapporte à un cas où les deux dispositifs (SIG et vision) aboutissent au même diagnostic quant à la vitesse réglementaire nécessaire pour la situation considérée. La deuxième simulation permettra de présenter l'intérêt de la fusion réalisée dans ce travail pour lever les conflits entre les deux sources.

5.5.2.1. Système de navigation et vision en accord

Reprenons l'exemple d'une conduite dans un contexte urbain. Considérons que le SIG nous délivre cette information avec un indice de confiance de 0.8 et de plus, indique une limitation de vitesse de 50km/h. Les critères permettant de calculer l'indice de confiance de la navigation ont été définis comme suit :

- Le critère C1 : GPS MLCP validé,
- Le critère C2 : Attribut ADAS validé,
- Le critère C3 : Classe Fonctionnelle FC1, FC2 validée,
- Le critère C4 : type de route communale ,
- Le critère C5 : contexte de conduite Ville,
- Le critère C6 : mode guidage non validé.

A travers le Tableau 4-3, la masse de croyance du système de navigation pour la limitation de vitesse 50 est calculée selon ces critères en utilisant l'équation :

$$m(SL_i) = \frac{\alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 + \alpha_3 C_3 + \alpha_4 C_4 + \alpha_5 C_5 + \alpha_6 C_6}{\sum_i \alpha_i}$$

Les coefficients d'affaiblissement des critères ont été pris comme suit : $\alpha_1 = 0.25$, $\alpha_2 = 0.5$, $\alpha_3 = 0.5$, $\alpha_4 = 1$, $\alpha_5 = 1$, $\alpha_6 = 0.25$. En utilisant ces coefficients, l'équation ci-dessus ainsi que les valeurs correspondant à ces critères dans le Tableau 4-2, les fonctions de masse de la limitation de vitesse résultante (50km/h) et des éléments focaux sont :

$$m(SL_6) = m(50) = 0.88.$$

$$m_n(SL_4) = m_n(30) = 0.83$$

$$m_n(SL_8) = m_n(70) = 0.68$$

$$m_n(SL_{11}) = m_n(100) = 0.37$$

$$m_n(SL_{12}) = m_n(110) = 0.37$$

$$m_n(SL_{13}) = m_n(120) = 0.37$$

$$m_n(SL_{14}) = m_n(130) = 0.37$$

$$m_n(SL_{15}) = m_n(999) = 0.37$$

Pour la limitation de vitesse issue du système de navigation, et pour chaque élément focal, on calcule les fonctions de croyance suivantes : $m_n(SL_i)$, $m_n(\overline{SL}_i)$ et $m_n(\overline{SL}_i \cup SL_i)$ afin d'effectuer par la suite la combinaison conjonctive de Demspter-Shafer. La fonction de croyance $m_n(\overline{SL}_i \cup SL_i)$ représente l'ignorance du système de navigation qui dépend du nombre d'éléments focaux considéré (7 dans ce cas). Nous avons choisi d'attribuer un niveau d'ignorance de 0.05 à chaque élément focal. Par conséquent l'ignorance de la navigation est égale à 0.35.

La Figure 5-16 montre les fonctions de masse du système de navigation ainsi obtenue pour la limitation de vitesse de 50km/h.

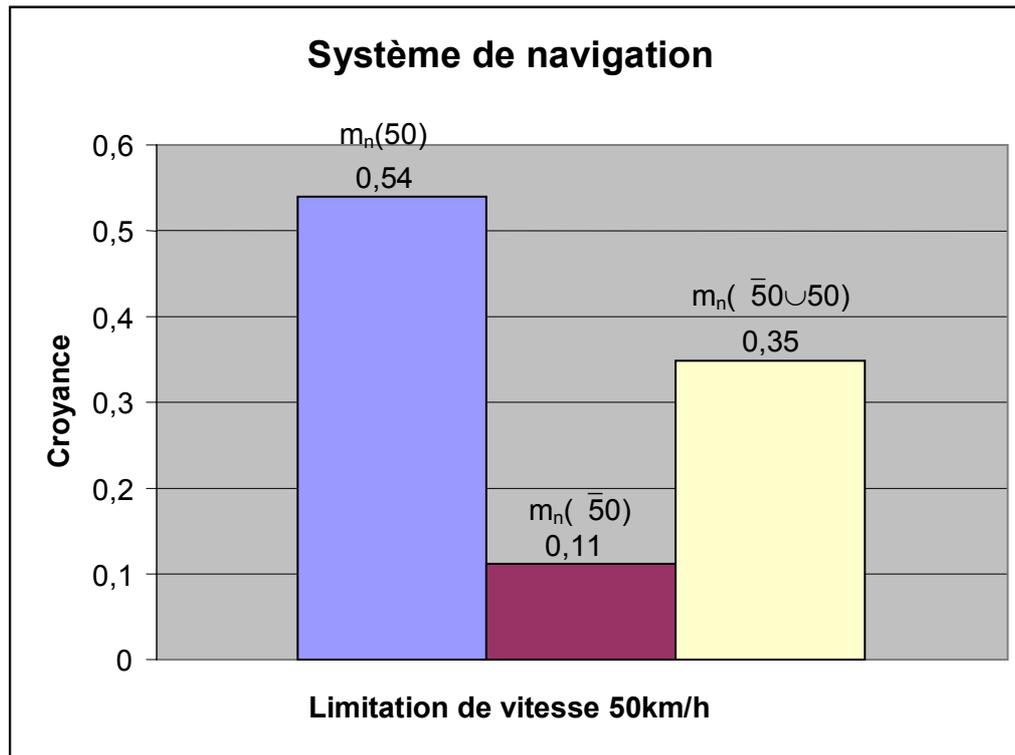


Figure 5-16 : Croyances du système de navigation

Intéressons-nous à présent au cas où le système de détection des panneaux de limitations de vitesse par vision confirme l'information du SIG en indiquant une vitesse réglementaire de 50km/h et un taux de confiance de 0.9. La fonction de masse du système de vision est égale à son indice de confiance. Comme cela a été mentionné dans le chapitre 4, on choisit une ignorance de 0.1 pour le dispositif de vision. Finalement, la Figure 5-17 présente les fonctions de masse du système de vision pour la limitation de vitesse de 50 km/h.

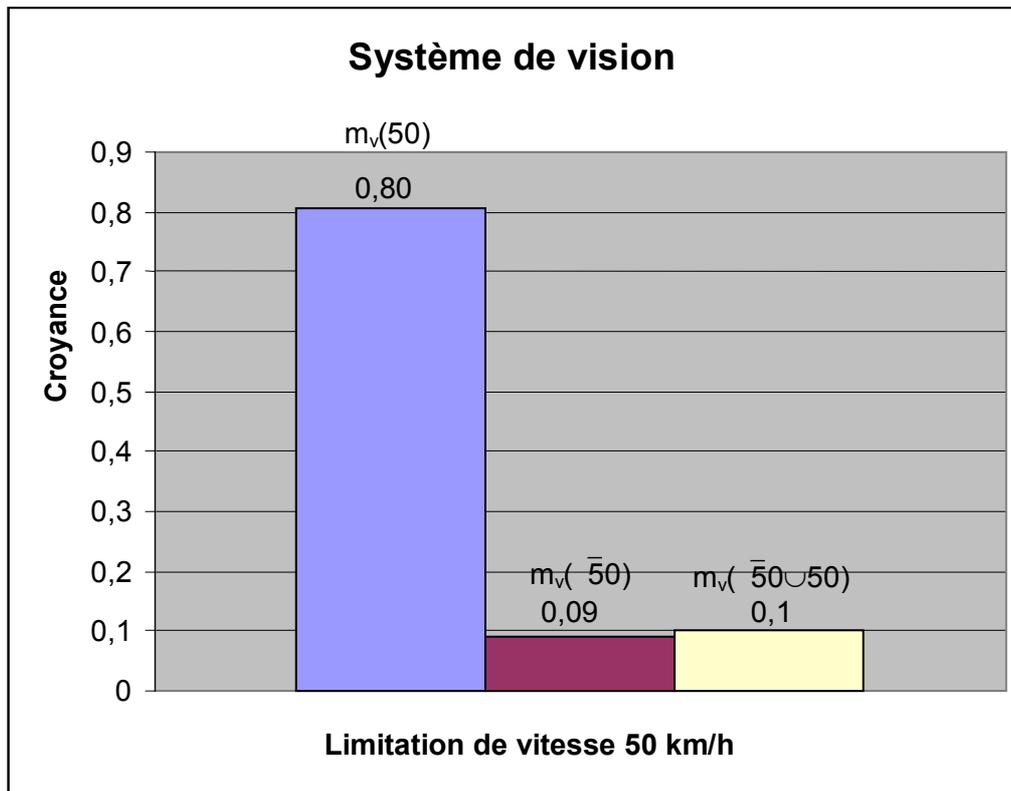


Figure 5-17 : Croyances du système de vision

Finalement, la Figure 5-18 décrit les résultats obtenus à partir de la fusion des deux processus par la combinaison conjonctive de Dempster-Shafer.

$$P_m(SL=50) = 0.84, P_m(\bar{SL}) = 0.12, P_m(\bar{SL} \cup SL) = 0.04.$$

Donc, le résultat de fusion est une limitation de vitesse de 50 avec un indice de confiance de 0.84 ($P_m(SL=50)$). Malgré la fonction de croyance faible de la navigation, la fonction de croyance du résultat est grande car renforcée par la fonction de croyance du système de vision. Le conflit est très bas ($k=0.09$) du fait que les deux systèmes donnent le même résultat. Il faut noter que la fonction de croyance du système de navigation est faible du fait du nombre d'éléments focaux considérés pour une limitation de vitesse 50 km/h. En effet, le nombre d'éléments focaux traduit directement l'ignorance que l'on a sur l'élément considéré.

Cet exemple illustre le fait que dans ce schéma de fusion, le capteur de vision peut venir, d'une part confirmer, et d'autre part consolider la décision prise sur la base de la navigation, lorsque celle-ci souffre d'une ignorance trop importante.

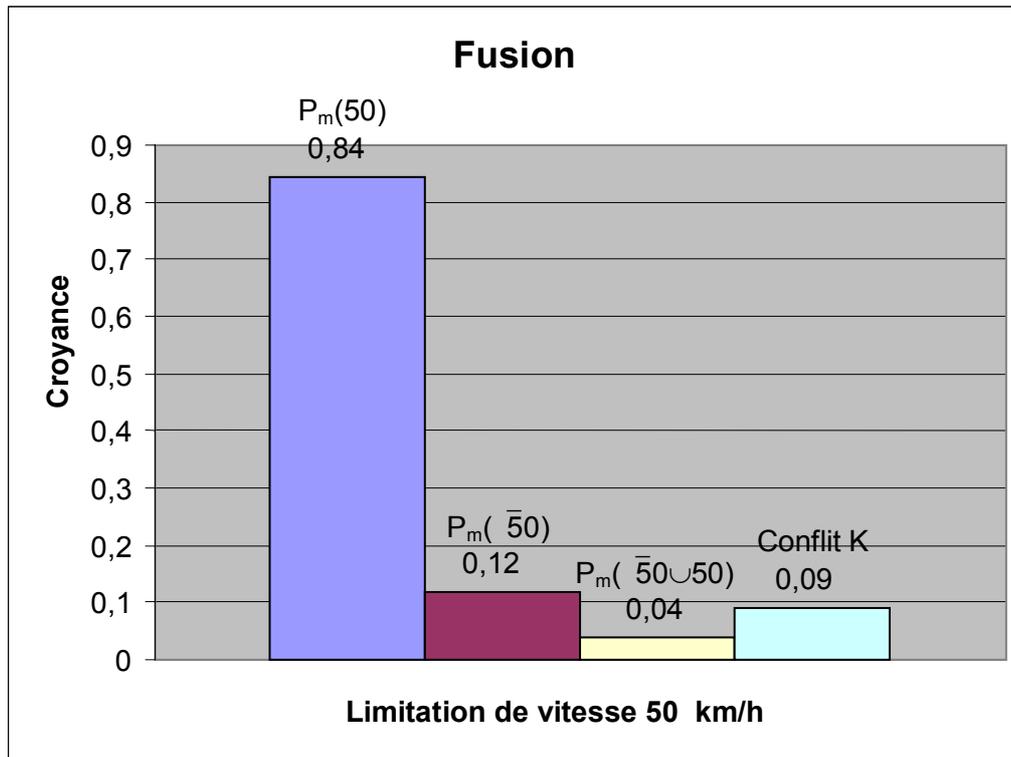


Figure 5-18 : Fusion pour la limitation de vitesse 50

5.5.2.2. Conflit entre le système de navigation et la vision

Un des problèmes de la navigation est la définition de la cartographie qui n'est pas assez précise. Le cas des zones urbaines est un problème très connu où la représentation de ces zones est précise à $\pm 100m$. Ceci est dû à leur représentation par des polygones qui ne représentent pas fidèlement la réalité. Un autre cas vient se rajouter à cette imprécision est celui des autoroutes qui passent à l'intérieur des zones urbaines. Dans ce cas, les deux attributs « ville » et « autoroute » sont détectés. En outre, le problème de positionnement peut être une source supplémentaire d'erreur pour ce type de situations. Généralement, les systèmes de navigation confondent en positionnement entre les routes qui sont en parallèle. Par conséquent, le système de navigation peut se tromper entre l'autoroute et une route parallèle à celle-ci qui fait partie d'une zone urbaine.

Reprenons l'exemple d'une conduite dans un contexte ambigu entre autoroute et ville. Considérons que le SIG nous délivre une information de contexte urbain avec un indice de confiance de 0.8 et de plus, indique une limitation de vitesse de 50 km/h. Les critères permettant de calculer l'indice de confiance de la navigation ont été définis comme suit :

- Le critère C1 : GPS MLCP Validé,
- Le critère C2 : Attribut ADAS Validé,
- Le critère C3 : Classe Fonctionnelle FC1, FC2 Validée,
- Le critère C4 : type de route départementale,
- Le critère C5 : contexte de conduite Ville,
- Le critère C6 : mode guidage non validé.

De la même façon que l'exemple précédent, à travers le Tableau 4-3, la masse de croyance du système de navigation pour la limitation de vitesse 50 est calculée selon ces critères

Les mêmes coefficients d'affaiblissement des critères ont été pris. En utilisant ces coefficients ainsi que les valeurs correspondant à ces critères dans le Tableau 4-2, les fonctions de masse de la limitation de vitesse résultante (50km/h) et des éléments focaux sont :

$$m(SL_6) = m(50) = 0.74.$$

$$\begin{aligned}
m_n(SL_4) &= m_n(30) = 0.60 \\
m_n(SL_8) &= m_n(70) = 0.83 \\
m_n(SL_{11}) &= m_n(100) = 0.37 \\
m_n(SL_{12}) &= m_n(110) = 0.37 \\
m_n(SL_{13}) &= m_n(120) = 0.37 \\
m_n(SL_{14}) &= m_n(130) = 0.37 \\
m_n(SL_{15}) &= m_n(999) = 0.37
\end{aligned}$$

De la même façon que l'exemple précédent, pour la limitation de vitesse issue du système de navigation, et pour chaque élément focal, on calcule les fonctions de croyance suivantes : $m_n(SL_i)$, $m_n(\bar{S}L_i)$ et $m_n(\bar{S}L_i \cup SL_i)$. De même pour le niveau d'ignorance où 0.05 a été attribué à chaque élément focal. Par conséquent l'ignorance de la navigation est égale à 0.35 (7 éléments focaux considéré dans ce cas).

La Figure 5-19 montre les fonctions de masse du système de navigation ainsi obtenue pour la limitation de vitesse de 50km/h.

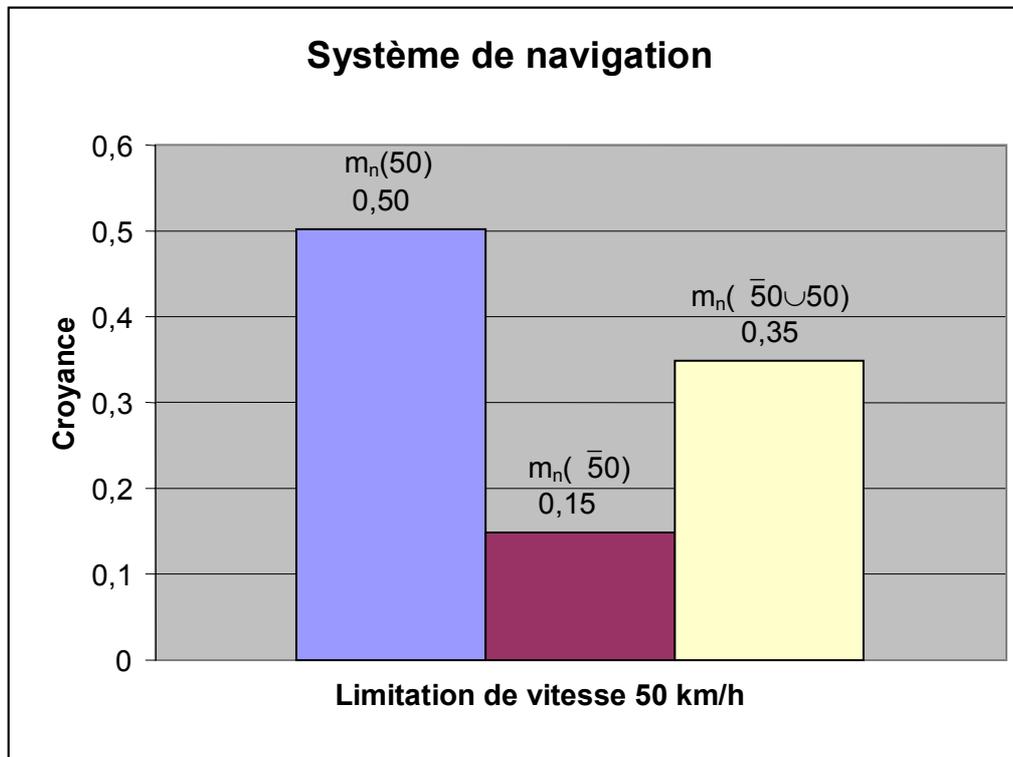


Figure 5-19 : Croyances du système de navigation

Intéressons-nous à présent au cas où le système de détection des panneaux de limitations de vitesse par vision contredit l'information du SIG en indiquant une vitesse réglementaire de 110km/h et un taux de confiance de 0.9. La fonction de masse du système de vision est égale à son indice de confiance et l'ignorance est de 0.1. Finalement, la Figure 5-20 présente les fonctions de masse du système de vision pour la limitation de vitesse de 110 km/h. Sur cette figure, est mentionné le facteur de conflit initial avant d'effectuer la fusion qui est très grand ($k=0.85$) du fait que les deux systèmes (vision et SIG) ne délivrent pas la même limitation de vitesse. Après fusion, le système de vision est en accord avec un élément focal de la navigation (110 km/h), ce qui fait baisser le facteur de conflit à $k=0.19$ après fusion (cf. Figure 5-21). Cette figure décrit les résultats obtenus à partir de la fusion des deux processus par la combinaison conjonctive de Dempster-Shafer.

$$P_m(SL=110) = 0.77, P_m(\bar{S}L) = 0.19, P_m(\bar{S}L \cup SL) = 0.04.$$

Donc, le résultat de fusion est une limitation de vitesse de 110 avec un indice de confiance de 0.77 ($P_m(SL=110)$). Ceci présente le cas où la fusion permet de lever une ambiguïté dans l'analyse de la situation lors d'une fausse détection d'un des deux capteurs.

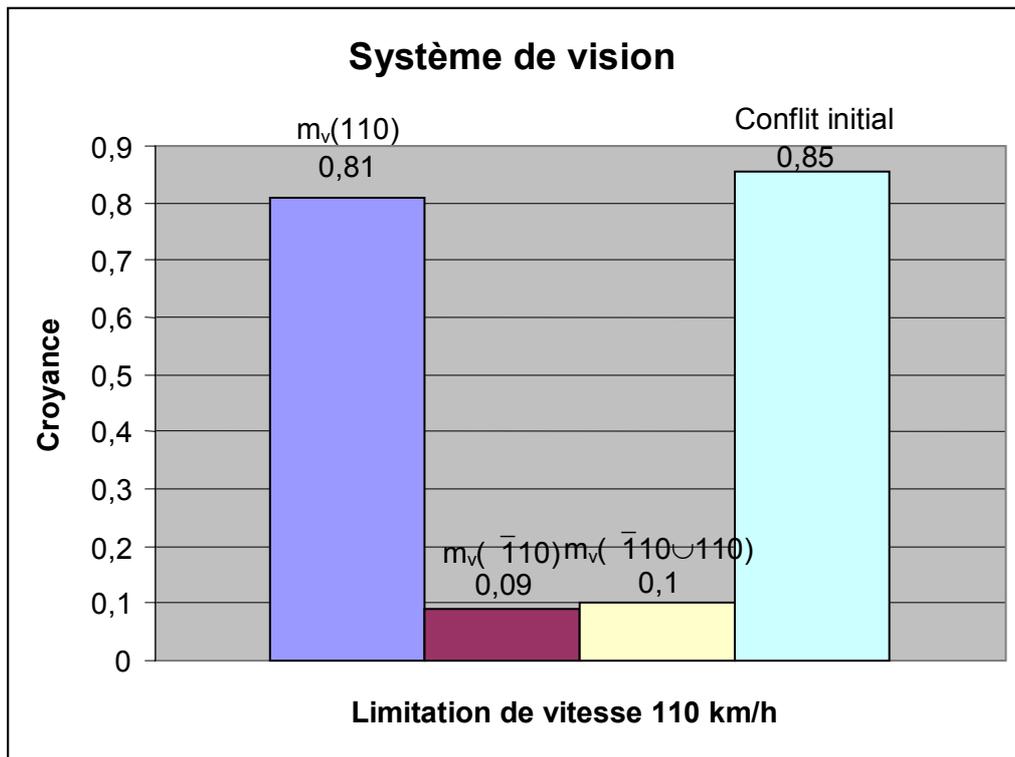


Figure 5-20 : Croyances du système de vision

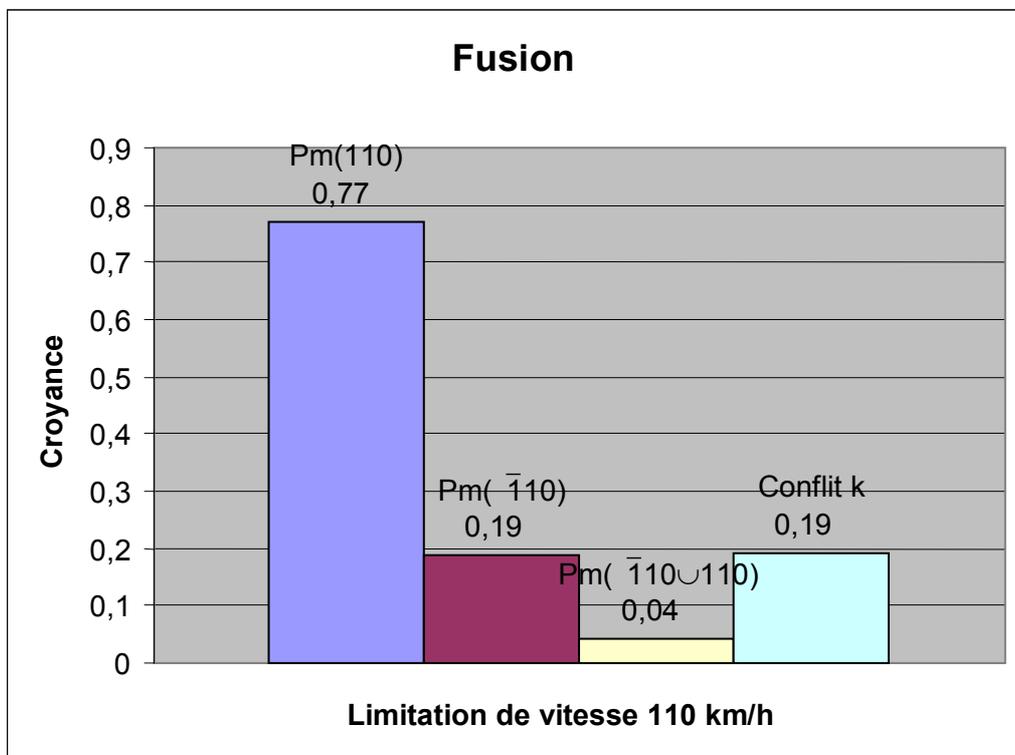


Figure 5-21 : Fusion pour la limitation de vitesse 110

5.6. Application des capteurs virtuels à l'optimisation des lois de commande d'éclairage AFS

Dans cette section sont décrits les résultats obtenus lors de la validation en simulation et en conditions réelles de l'éclairage AFS assisté par les capteurs virtuels. Il s'agit dans un premier temps de décrire les résultats de simulation pour les deux capteurs virtuels d'horizon glissant évènementiel et de détermination de situations de conduite. Ensuite, les résultats de validation en conditions réelles de l'éclairage AFS assisté par le capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel sont présentés.

5.6.1. Résultats de simulation

5.6.1.1. AFS assisté par le Capteur d'Horizon Glissant Evènementiel

Les premiers tests de validation du capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel ont été faits en simulation HIL dans l'objectif d'optimiser l'éclairage AFS. Cette validation a été faite sur le véhicule expérimental en utilisant les matériels présentés ci-dessus. Le modèle Simulink modifié a été chargé dans le MicroAutobox de dSPACE. Le système de navigation ADASRP a été utilisé en simulations avec différents types de situations de conduite (Autoroute, Ville, Rond-point, Intersection, ...). Une console a été utilisée pour l'affichage dans ADASRP des différentes informations envoyées du capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel vers le modèle de commande de l'éclairage AFS. Ces informations concernent les commandes d'activation et de désactivation des fonctions TL, ML et FBL+DBL ainsi que le rayon de courbure du virage en amont du véhicule. Ensuite, selon les différentes situations de conduite, le comportement des projecteurs AFS (TL, ML, FBL+DBL) est évalué subjectivement et objectivement. L'évaluation subjective consiste à voir l'allumage et l'extinction des lames FBL pour le TL, de l'élévation de l'optique Bi-Xénon pour le ML et la rotation horizontale de ce dernier pour le DBL selon le profil routier affiché sur ADASRP. L'évaluation objective est effectuée en traçant les courbes d'activation des différentes commandes.

Pour la simulation HIL concernant le TL, on simule le cas d'un itinéraire en dehors de la ville puis qui passe en ville et qui sort encore de la ville pour voir le comportement du capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel. Ceci est fait en vérifiant l'allumage et l'extinction des 2 lampes FBL des deux projecteurs AFS utilisées simultanément pour assurer la fonction TL. Pour cet itinéraire, les résultats sont montrés sur la Figure 5-22 pour l'activation du TL et la Figure 5-23 pour sa désactivation. A l'entrée de la ville, le « flag » [TL_FLAG] est mis à 1 et il reste sur 1 jusqu'à la sortie de la ville où il est mis à 0. La Figure 5-24 montre le « flag » d'activation tout au long de l'itinéraire en dehors de la ville et en ville. Ce tracé montre la détermination de la zone urbaine en utilisant le capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel au lieu de l'aspect ponctuel qui existe dans ADASRP.

Une simulation HIL a été faite aussi sur un itinéraire dans un rond-point. Les résultats sont montrés sur la Figure 5-25 pour l'activation du TL et la Figure 5-26 pour sa désactivation. A l'entrée du rond-point, le « flag » [TL_FLAG] est mis à 1 et il reste sur 1 jusqu'à la sortie du rond-point où il est mis à 0. Le comportement des lampes FBL pour le TL a été évaluée subjectivement avec allumage et extinction correspondant « flags ». La Figure 5-27 montre le « flag » d'activation tout au long de l'itinéraire avant et dans le rond-point. Ce tracé montre la détermination du rond-point en utilisant le capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel au lieu de l'aspect ponctuel qui existe dans ADASRP. Il a été remarqué que l'allumage et l'extinction des FBL (pour le TL) étaient conformes avec les « flags » affichés sur la console d'ADASRP et avec l'IHM de ControlDesk.

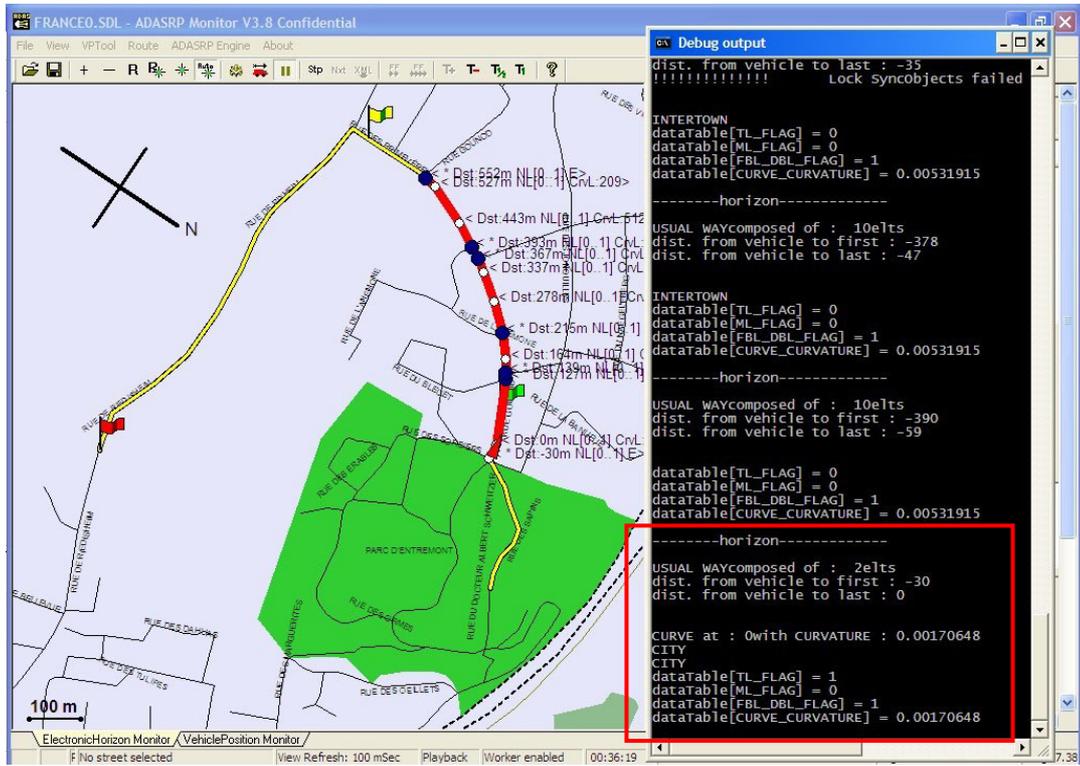


Figure 5-22 : Activation du TL en entrée de ville

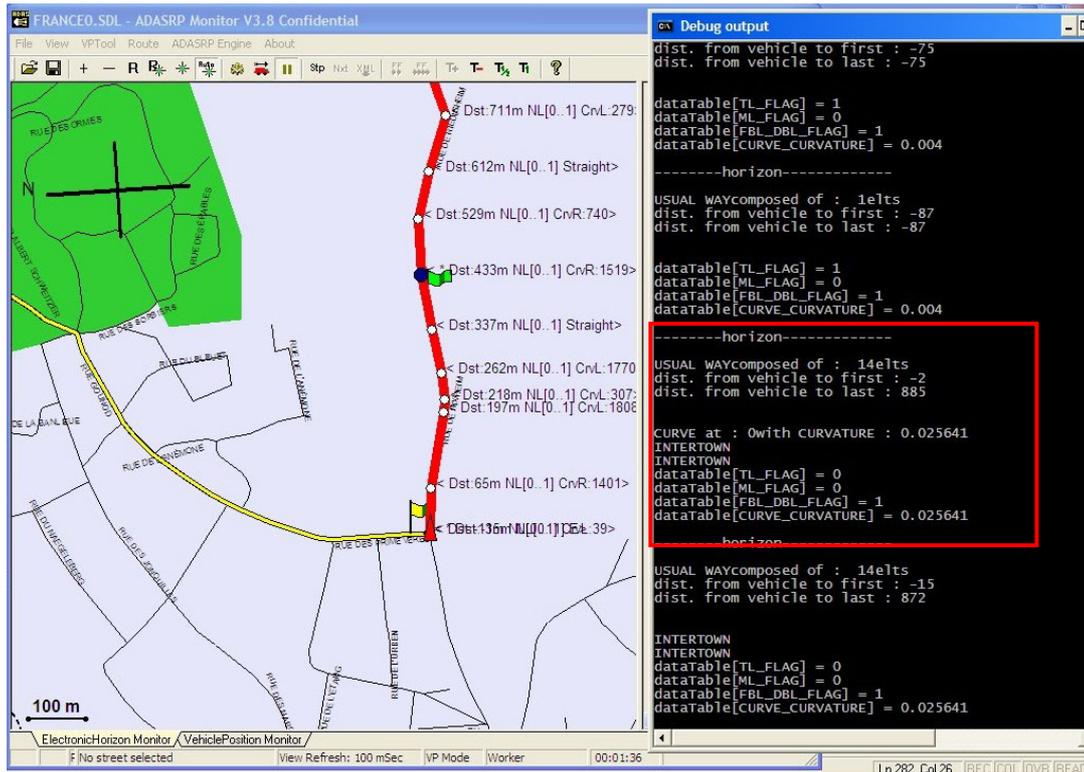


Figure 5-23 : Désactivation du TL en sortie de ville

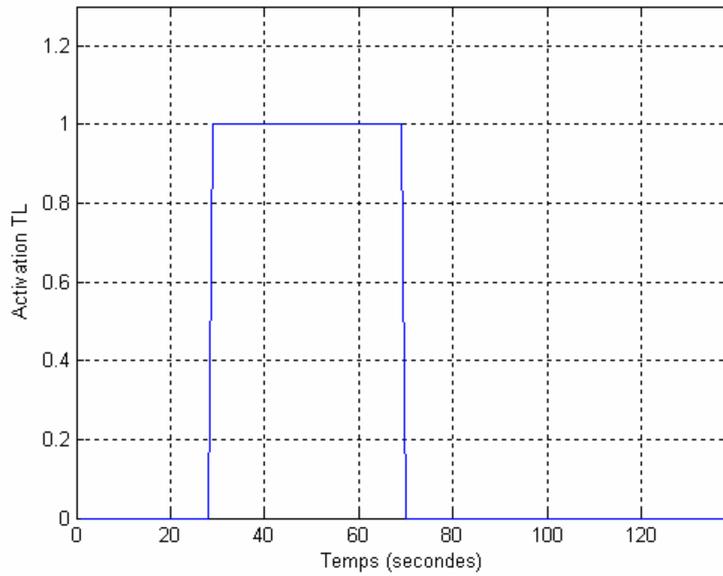


Figure 5-24 : Activation du TL en ville pour l'itinéraire de la Figure 5-23

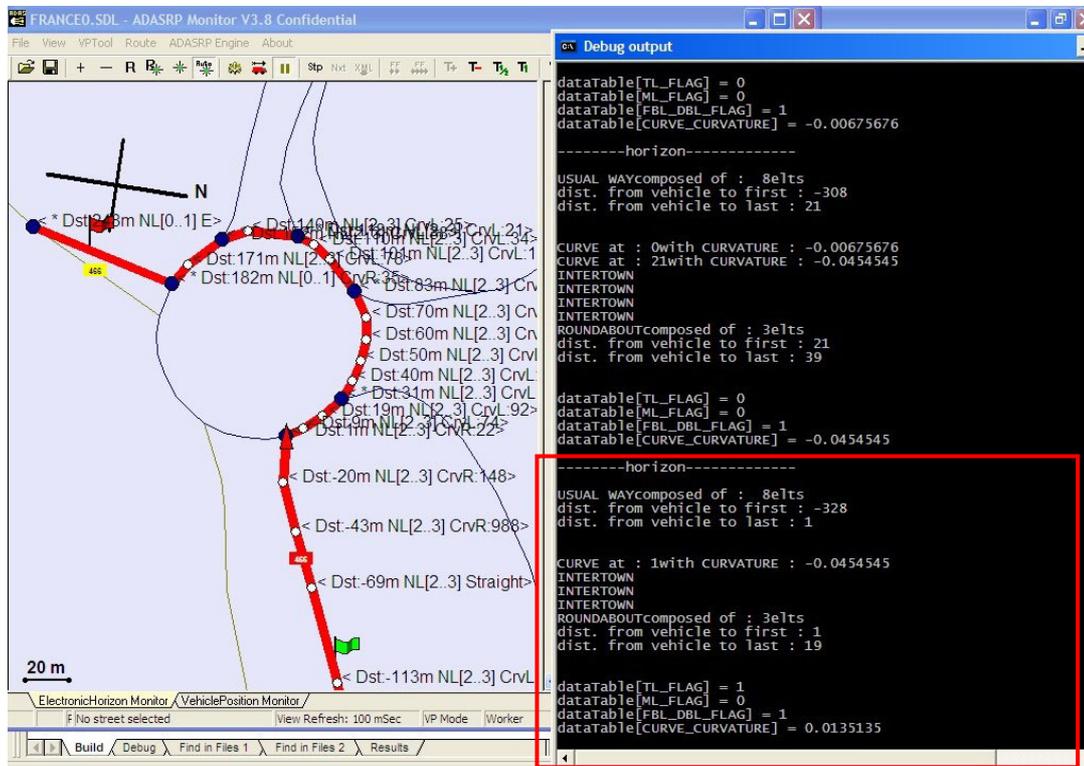


Figure 5-25 : Activation du TL dans le rond-point

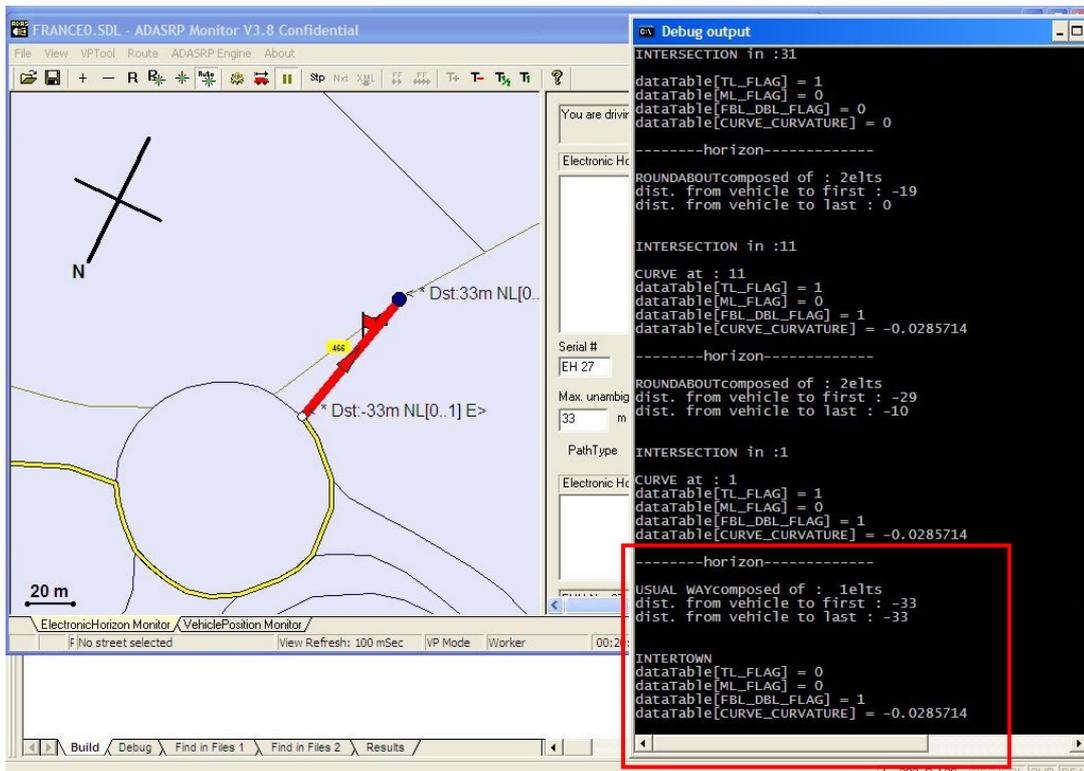


Figure 5-26 : Désactivation du TL en sortie de rond-point

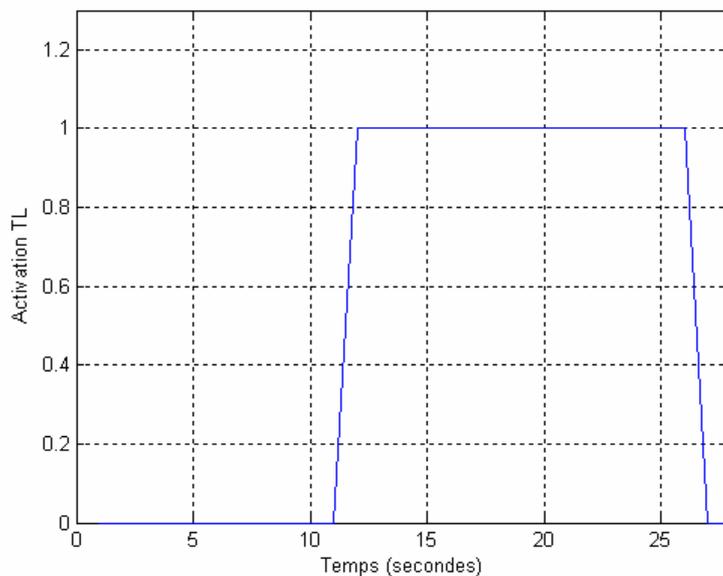


Figure 5-27 : Activation du TL pour le rond-point de la Figure 5-25

Pour la simulation HIL concernant le ML, on simule le cas d'un itinéraire en autoroute pour voir le comportement du capteur virtuel d'horizon glissant événementiel. Ceci est fait en vérifiant l'élévation des deux optiques Bi-Xénon des deux projecteurs AFS utilisées pour le ML. Pour cet itinéraire, les résultats sont montrés sur la Figure 5-28 pour l'activation du ML et la Figure 5-29 pour sa désactivation. A l'entrée de l'autoroute, le « flag » [ML_FLAG] est mis à 1 et il reste sur 1 jusqu'à la sortie l'autoroute où il est mis à 0. La Figure 5-30 montre le « flag » d'activation tout au long de l'itinéraire en dehors de l'autoroute et en autoroute. Ce tracé montre la détermination de la zone autoroutière en utilisant le capteur virtuel d'horizon glissant événementiel au lieu de l'aspect ponctuel qui existe dans ADASRP. Il a été remarqué que l'élévation des optiques pour le ML était conforme avec les « flags » affichés sur la console d'ADASRP et avec l'IHM de ControlDesk.

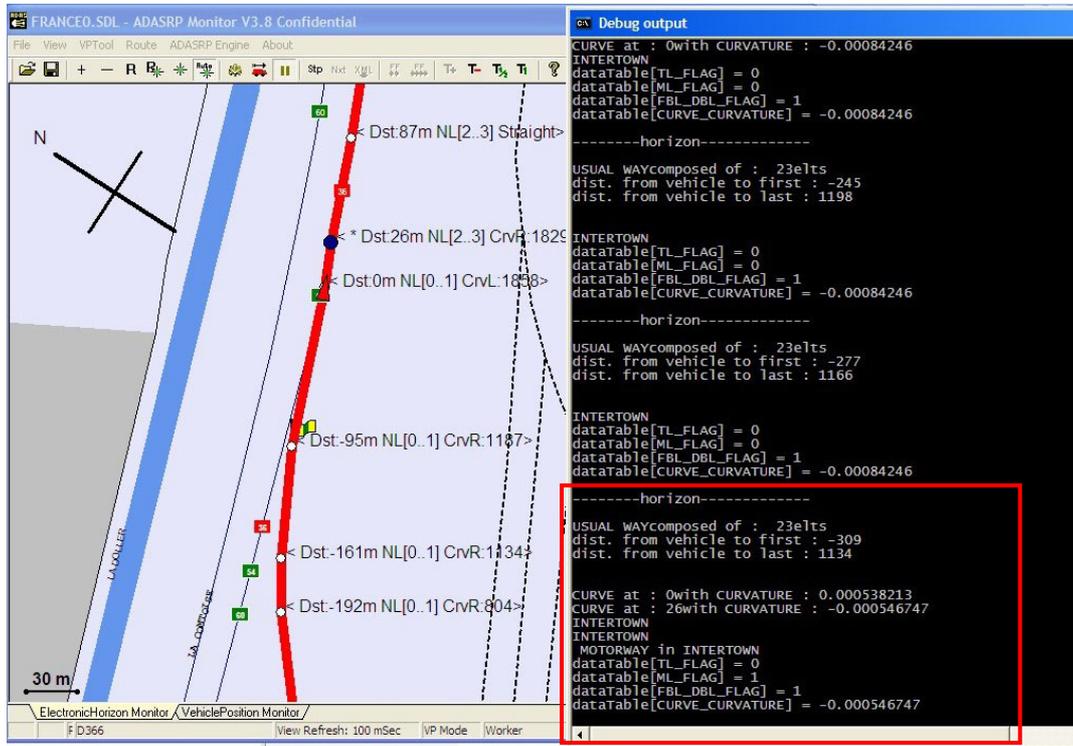


Figure 5-28 : Activation du ML en entrée d'autoroute

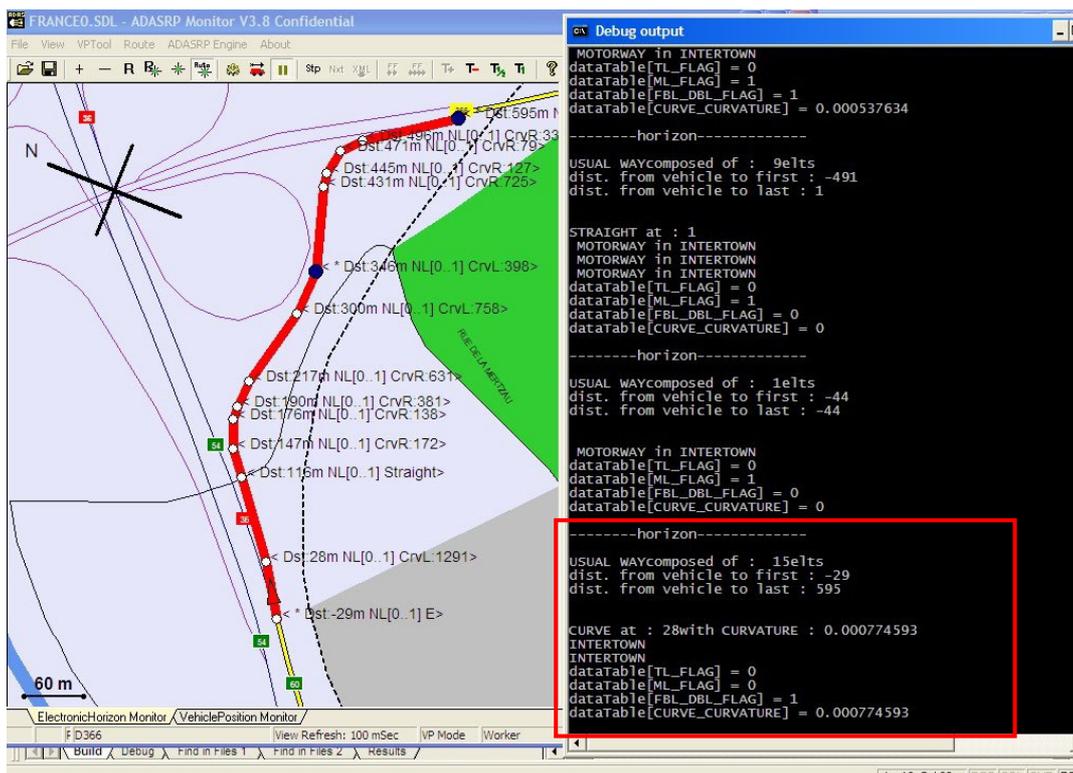


Figure 5-29 : Désactivation du ML en sortie d'autoroute

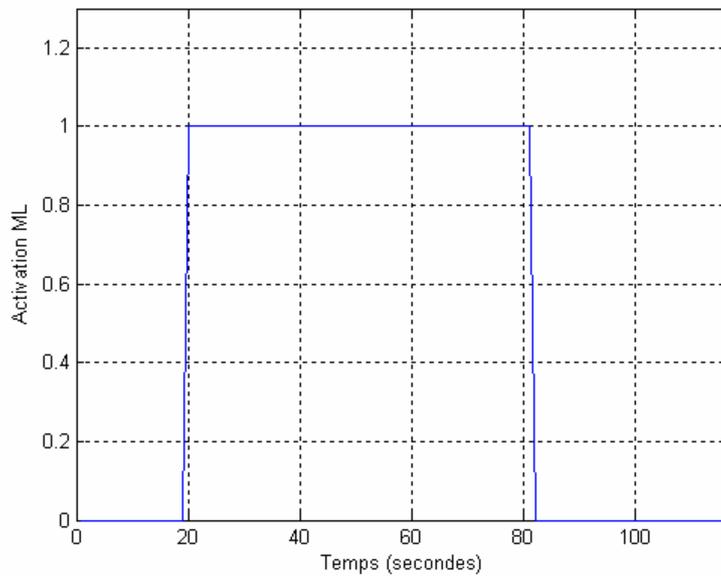


Figure 5-30 : Activation du ML en autoroute de l'itinéraire des figures Figure 5-28 et Figure 5-29

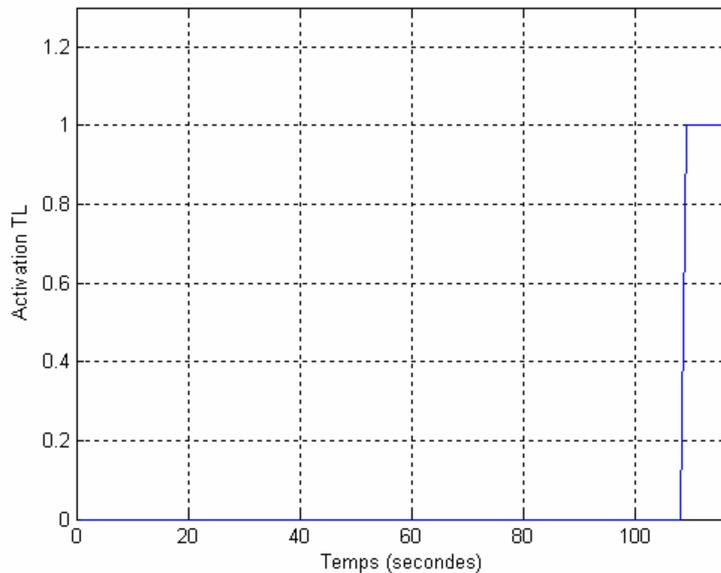


Figure 5-31 : Activation du TL en entrée de ville après sortie d'autoroute (Figure 5-29)

Pour la simulation HIL concernant le DBL, on simule le cas d'un itinéraire avec deux virages pour voir le comportement du capteur virtuel d'horizon glissant événementiel. Ceci est fait en vérifiant la rotation horizontale des deux optiques Bi-Xénon des deux projecteurs AFS utilisées pour le DBL. Le tracé en X et Y de ces deux virages est montré sur la Figure 5-34. Pour cet itinéraire, les résultats sont montrés sur la Figure 5-32 pour l'activation du DBL en entrée du premier virage et la Figure 5-33 pour sa désactivation en sortie du deuxième virage. A l'entrée du premier virage, le « flag » [FBL_DBL_FLAG] est mis à 1 et il reste sur 1 jusqu'à la sortie du deuxième virage où il est mis à 0. La Figure 5-35 montre le « flag » d'activation tout au long de l'itinéraire en dehors et à l'intérieur des deux virages. Ce tracé montre la détermination des virages en utilisant le capteur virtuel d'horizon glissant événementiel au lieu de l'aspect ponctuel qui existe dans ADASRP. La Figure 5-36 montre les rayons de courbure des points composant les virages. Ces valeurs montrent l'imprécision de représentation de la cartographie où les rayons de courbure varient d'une façon qui ne représente pas le profil des virages.

Il a été remarqué que la rotation horizontale des optiques pour le DBL était conforme avec les « flags » affichés sur la console d'ADASRP et avec l'IHM de ControlDesk. Les sens de rotations étaient aussi conformes aux signes des courbures des points composant les virages (négatif pour un virage à droite et positif pour un virage à gauche).

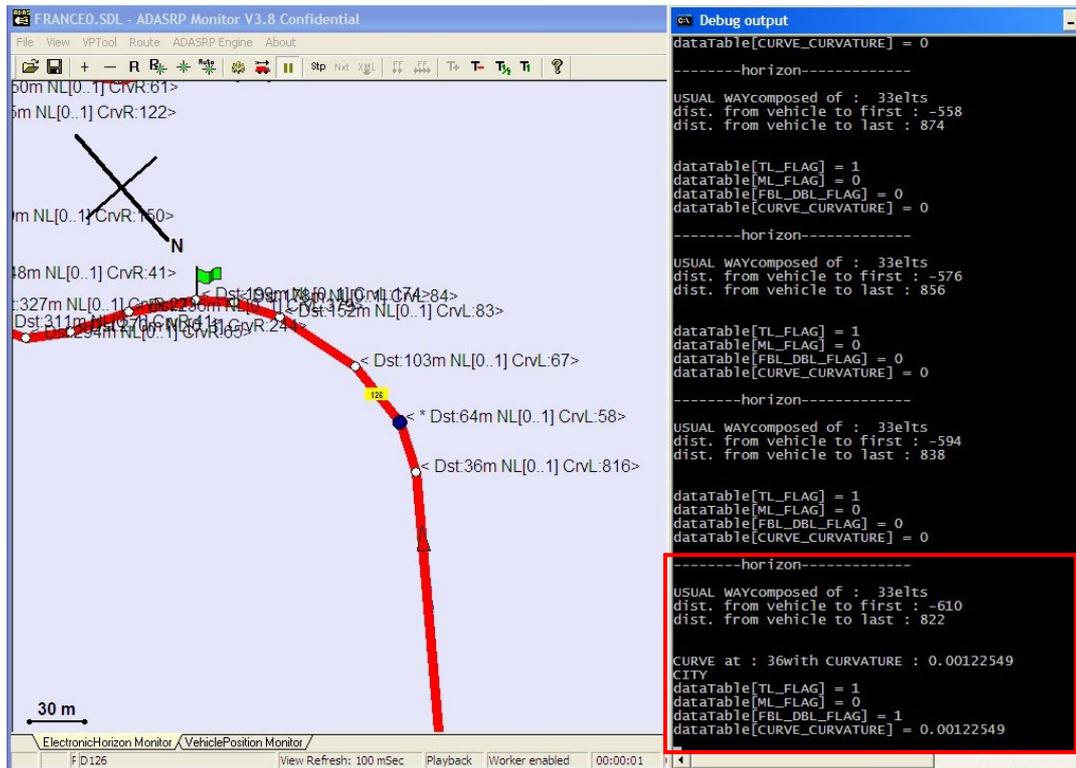


Figure 5-32 : Activation du FBL+DBL en entrée de virage

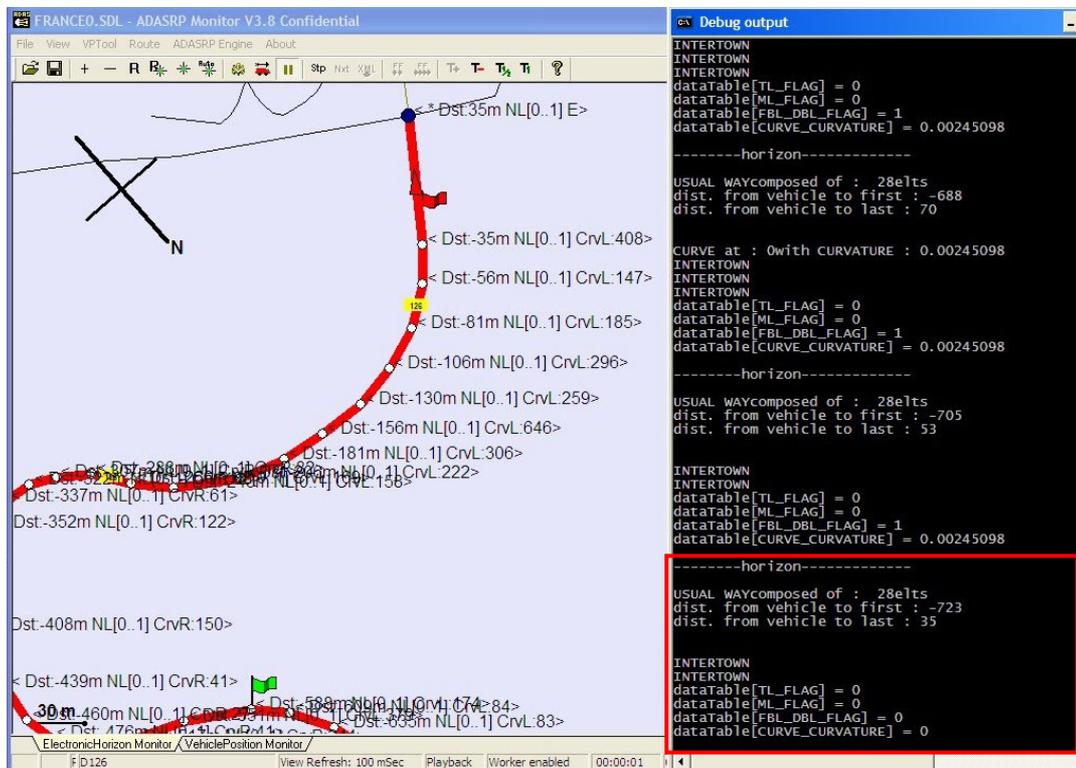


Figure 5-33 : Désactivation du FBL+DBL en sortie de virage

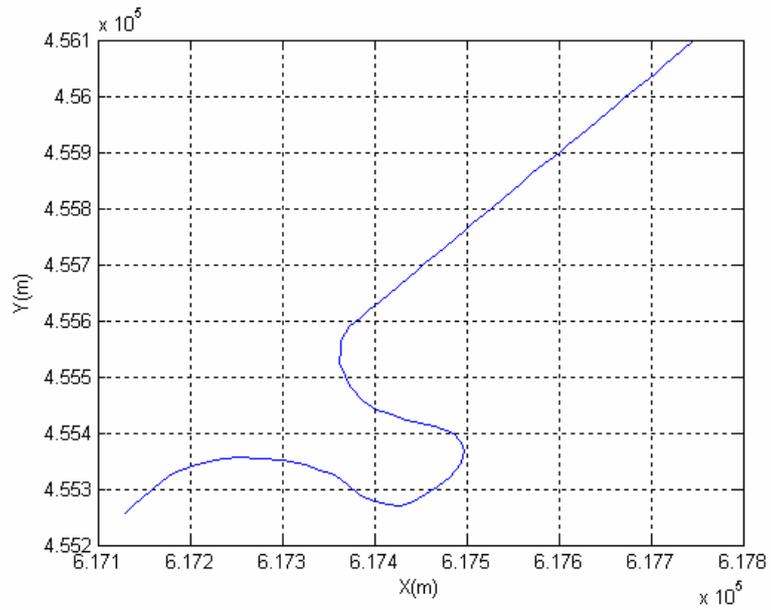


Figure 5-34 : Tracé en X et Y des deux virages

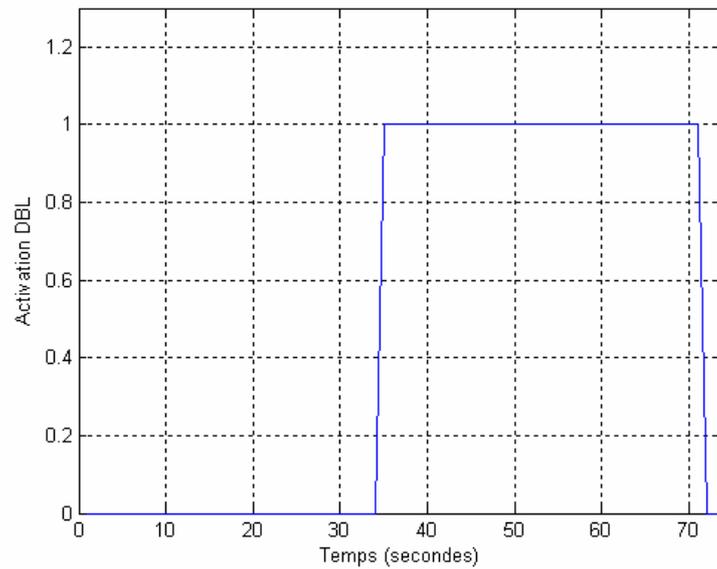


Figure 5-35 : Activation du FBL+DBL dans les deux virages de la Figure 5-34

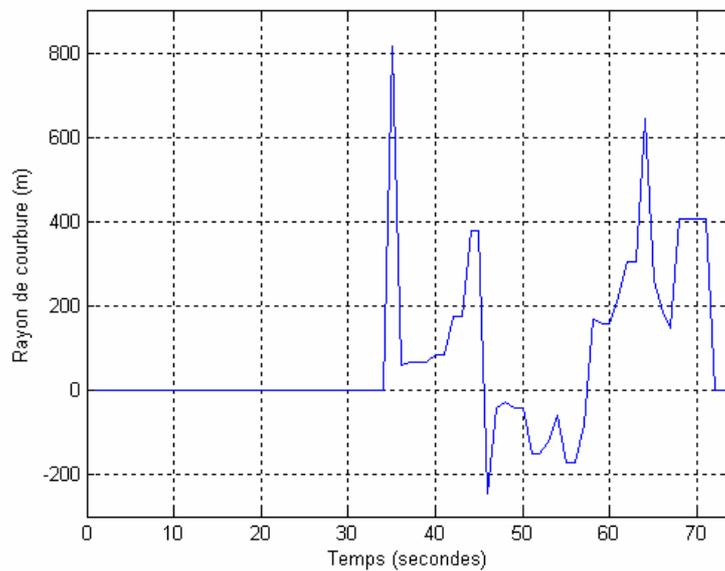


Figure 5-36 : Rayons de courbure dans les deux virages de la Figure 5-34

5.6.1.2. AFS assisté par le capteur de détermination des situations de conduite

Pour la simulation HIL du capteur de détermination des situations de conduite, des enregistrements des informations de la navigation et de la vision (caméra) ont été effectués. Ensuite, ces informations ont été rejouées sur ^{RT}Maps[®] avec génération des « flags » TL et ML et envoi de ces « flags » vers le modèle Simulink de commande d'éclairage AFS chargé dans le MicroAutobox. Le diagramme ^{RT}Maps[®] de rejeu est montré sur la Figure 5-37. Sur le diagramme, le rejeu des enregistrements est effectué en utilisant le module « Player » de ^{RT}Maps[®]. Le module de détection des limitations de vitesse par vision est entouré par le rectangle bleu nommé « Vision ». Sa partie IHM est aussi entourée avec un rectangle bleu qui est nommé « IHM de vision ». La partie entourée par le rectangle vert représente le module de fusion avec son IHM. Cette partie est le capteur virtuel de détermination des situations de conduite. La partie entourée avec le rectangle orange est la partie de traitement et formatage des informations de la navigation avant d'être transmises vers le module de fusion (capteur de détermination des situations de conduite). La partie entourée avec le rectangle jaune représente les « flags » TL et ML à envoyer au modèle Simulink de commande de l'éclairage AFS. Le software ControlDesk de dSPACE est aussi utilisé, pour la visualisation des différents « flags » dans ce modèle Simulink chargé dans le MicroAutobox.

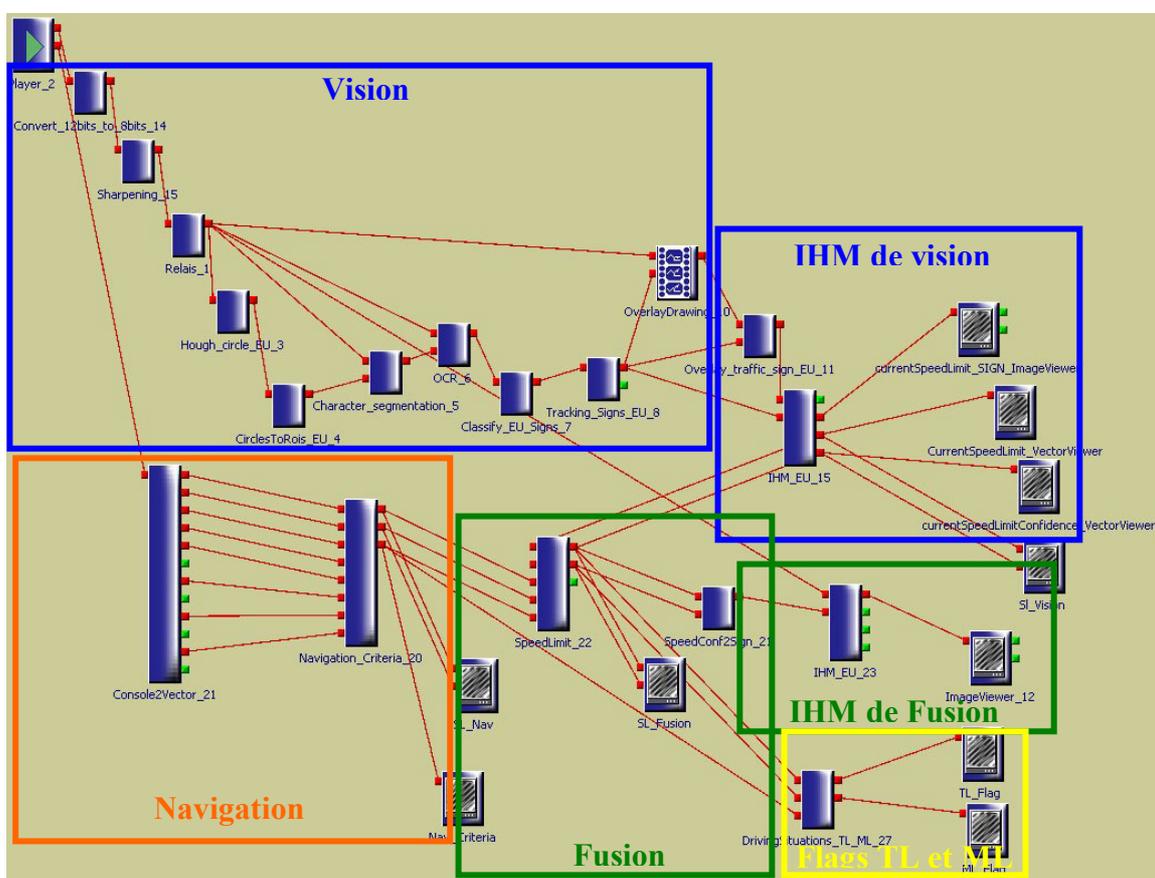


Figure 5-37 : Diagramme RTMaps[®] des simulations HIL pour l'optimisation de l'éclairage AFS (en rejeu)

En rejouant un enregistrement effectué en autoroute, les résultats sont montrés sur la Figure 5-38 où l'on voit que le système de navigation et le système à base de vision donnent des limitations de vitesse à 110 km/h qui sont affichées sur l'IHM (en haut de l'image). En outre, le système de navigation donne le quatrième critère à « 7 », ce qui représente une route Européenne qui est équivalent au critère « Autoroute » (cf. l'affichage sur le « Vector Viewer » nommé « Nav_Criteria » sur la figure). Le module de fusion donne une limitation de vitesse à 110 km/h qui est affichée sur l'IHM. Le module « DrivingSituations » envoie par conséquent un « flag » ML à 1 (cf. l'affichage sur le « Vector Viewer » nommé « ML_Flag » sur la figure).



Figure 5-38 : Résultats de simulation HIL du capteur de détermination de situations de conduite – Conduite en autoroute

5.6.2. Validation en conditions réelles

5.6.2.1. AFS assisté par le Capteur d'Horizon Glissant Evènementiel

Le capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel a été testé sur le véhicule expérimental lors d'essais de nuit menés à Mulhouse et à Paris. Les itinéraires choisis comportent des sections d'autoroutes, des passages en ville et hors ville, des ronds – points, des intersections, des successions de virages, ...permettant ainsi d'évaluer le comportement des différentes fonctions d'éclairage dans des situations réelles de conduite.

Ces essais entrent avaient pour objectifs :

- D'étudier la faisabilité de la commande d'éclairage basée sur le capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel utilisant la navigation,
- De vérifier l'aspect temps – réel de l'application,
- D'évaluer les apports et éventuellement les biais de ces nouvelles fonctions d'éclairage pour le conducteur,
- De statuer sur l'anticipation pouvant être obtenue.

Ces essais ont été effectués par des experts de l'éclairage de Valeo, par quelques personnes du laboratoire qui n'ont pas d'expérience dans le domaine de l'éclairage automobile.

En outre, cette validation vise à analyser l'influence de la précision de la cartographie et des pertes des informations de la navigation sur la commande d'éclairage.

Les essais ont ainsi d'une part confirmé l'intérêt de l'utilisation de la navigation pour un éclairage automobile prédictif et anticipatif et d'autre part montré les limitations d'ADASRP dues :

- A la précision de la cartographie : représentation imprécise des zones urbaines, perte de localisation liée à un manque de réactualisation de la cartographie, précision des rayons de courbure des virages....
- Au calcul de l'horizon électronique : dans le cas de l'inexistence du mode guidage.

– Au positionnement : inexistence d'un indice de qualité de la navigation.

C'est pourquoi, nous étions amené par la suite à considérer d'autres sources d'informations pouvant pallier à l'absence d'informations de navigation et permettant d'assurer une commande d'éclairage efficace et robuste. Nous avons utilisé la vision comme une autre source d'information. La prise en compte de l'ensemble de ces informations dans un schéma de fusion multicapteurs a été fait dans le cadre du capteur de détermination des situations de conduite. Ceci était dans le but d'une prise de décision par rapport aux situations de conduite.

Pendant les essais réels réalisés, les résultats présentés dans la partie de simulations HIL (cf. § 5.6.1) ont été confirmés où on voyait l'activation et la désactivation conformes aux « flags » affichés sur la console d'ADASRP consacrée au capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel.

En outre, pendant ces essais des enregistrements ont été faits pour analyser d'une manière objective la performance de notre capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel notamment en terme d'anticipation dans les virages. Ces enregistrements ont été effectués sur le MicroAutobox en utilisant des blocs « Flight Recorder » dans le modèle Simulink qui y est chargé. Les enregistrements ont concerné l'angle au volant du véhicule, la vitesse du véhicule, la rotation du DBL basé sur l'angle au volant et la rotation du DBL basé sur le capteur d'horizon glissant évènementiel (noté « sur la navigation » sur les figures présentant les résultats). Pour cette analyse, une comparaison de la rotation du DBL utilisant ce capteur virtuel avec celle utilisant l'angle au volant a été effectuée. Ceci était dans le but d'évaluer l'anticipation fournie par le capteur virtuel développé. Pour le virage de la Figure 5-39, la rotation du DBL gauche est montrée sur la Figure 5-40 et celle du DBL droit sur la Figure 5-41.

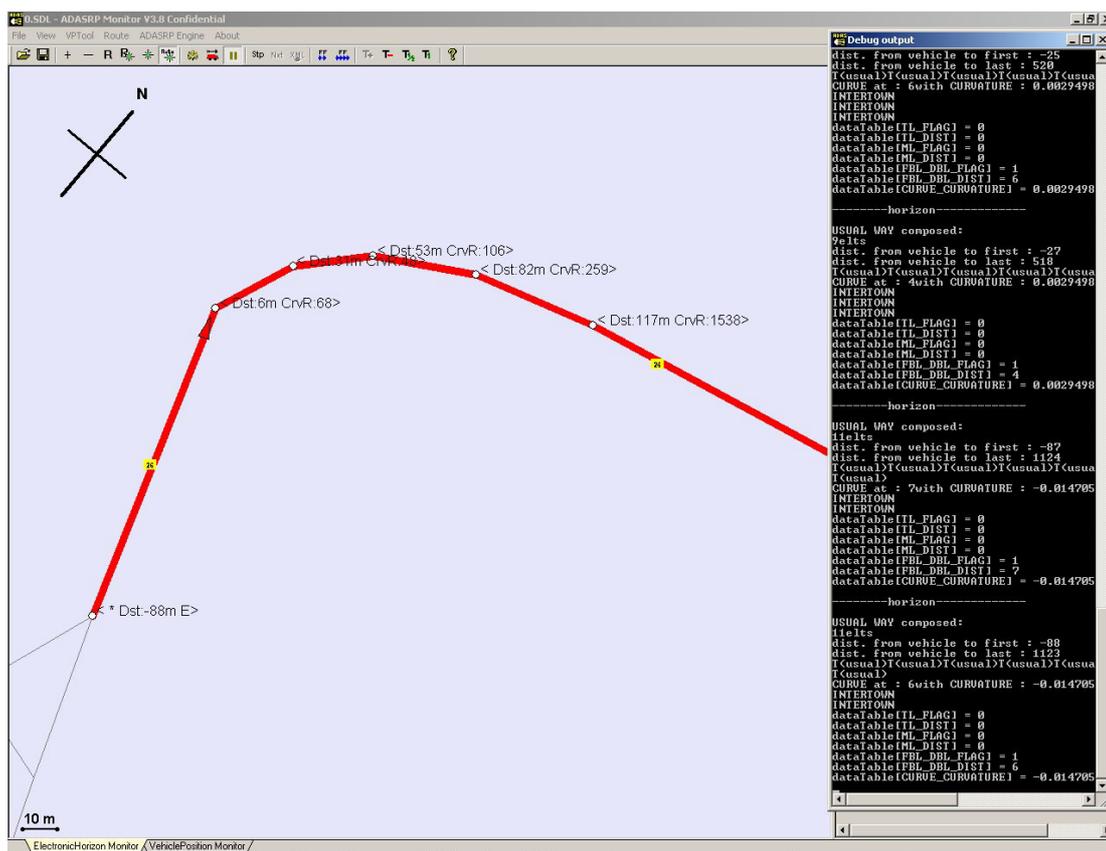


Figure 5-39 : Un virage de test réel

Dans le cas de la commande par l'angle au volant, il convient de noter que dans l'intervalle de 0 à 5 secondes les mouvements des phares sont dus à des manœuvres ayant pour objectif de positionner le véhicule dans la voie après avoir quitté le point de départ. La phase de négociation du virage débute réellement à ≈ 13 s. Durant la négociation du virage débutant à ≈ 13 s, le système basé sur le capteur d'horizon glissant évènementiel (noté « basé sur la navigation » sur les figures) montre une

anticipation significative du virage par rapport au système basé sur l'angle au volant. Sur cette illustration, l'on constate que la rotation des phares pour la méthode basée sur la navigation est très rapide au début du virage (variation importante de l'angle de rotation). Ceci traduit une variation importante de la courbure prise en compte par ce capteur virtuel.

Pour la commande par angle au volant, la rotation commence en retard car le conducteur ne tourne le volant qu'après avoir entamé le virage. La rotation suit les sollicitations du conducteur sur le volant et non pas le profil du virage. Ce qui n'est pas anticipatif. Enfin, on constate également une variation de rotation des phares en début et fin de virage plus faible que pour la commande basée sur le capteur virtuel (noté « basé sur la navigation » sur les figures). Ceci illustre la progressivité de braquage du conducteur.

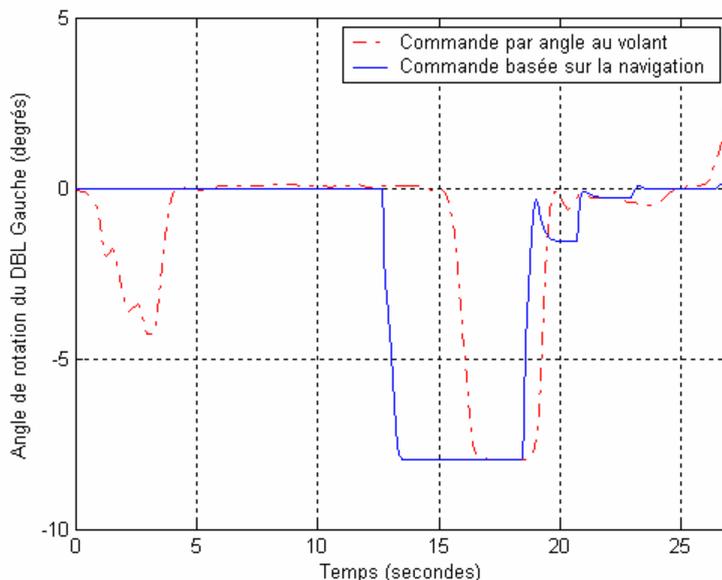


Figure 5-40 : Rotation du DBL gauche basé sur le capteur virtuel d'horizon glissant événementiel (pour un virage)

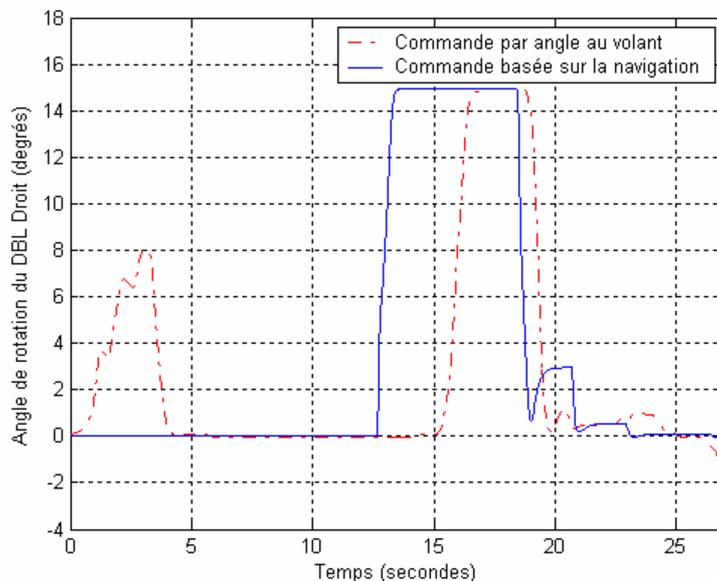


Figure 5-41 : Rotation du DBL droit basé sur le capteur virtuel d'horizon glissant événementiel (pour un virage)

Une autre illustration a été faite sur deux virages successifs qui sont montrés sur la Figure 5-42. Pour ces deux virages, la rotation du DBL gauche est montrée sur la Figure 5-43 et celle du DBL droit sur la Figure 5-44.

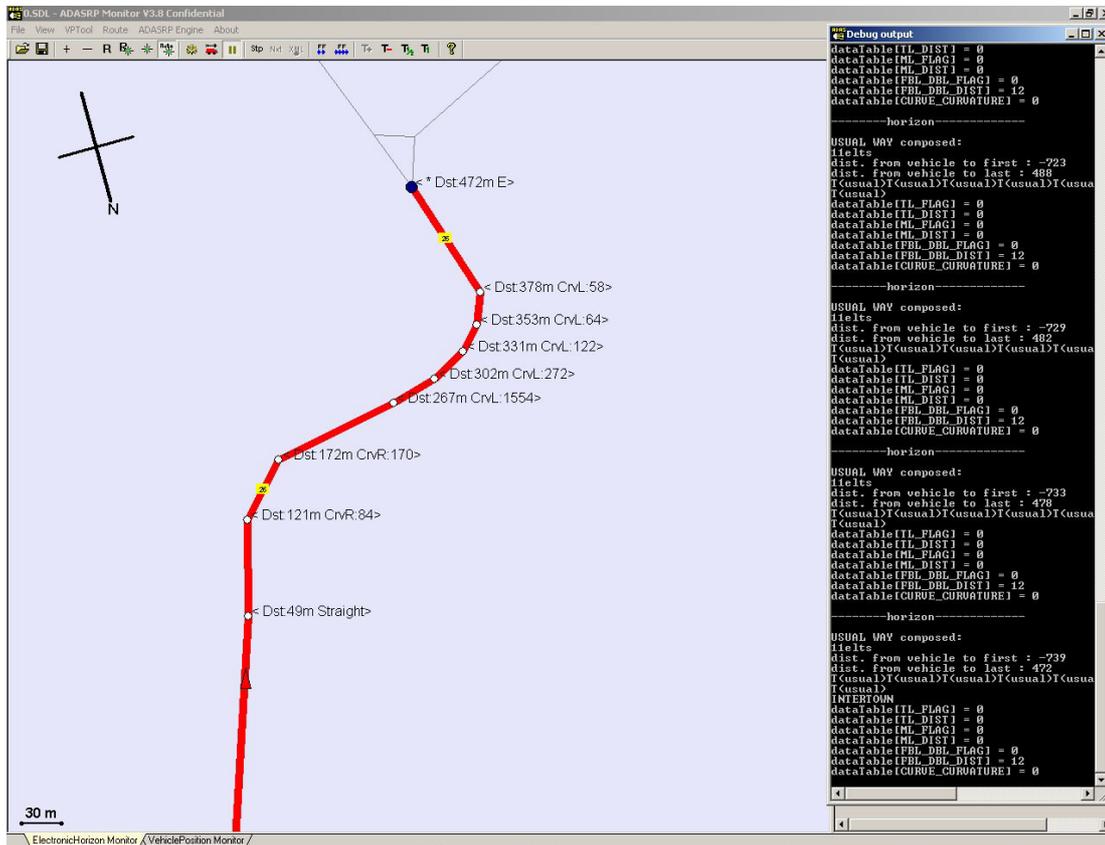


Figure 5-42 : Deux virages de test réel

Les résultats montrent une légère anticipation du capteur virtuel par rapport à l'angle au volant. Ceci est dû probablement à la précision du positionnement et/ou de la cartographie.

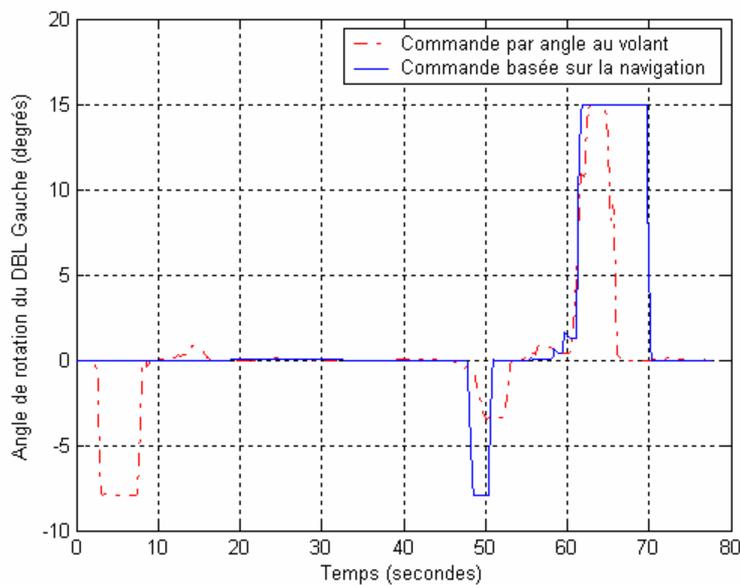


Figure 5-43 : Rotation du DBL gauche basé sur le capteur virtuel d'horizon glissant événementiel (pour deux virages)

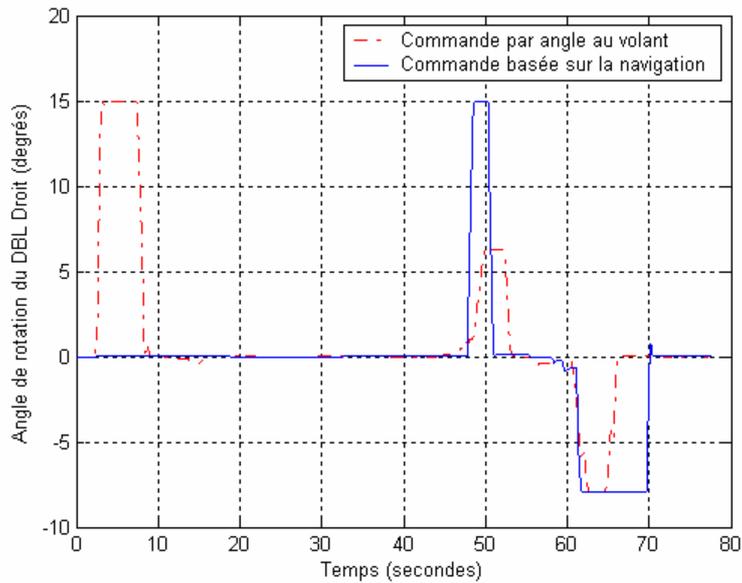


Figure 5-44 : Rotation du DBL droit basé sur le capteur virtuel d’horizon glissant évènementiel (pour deux virages)

5.6.2.2. Paramétrage pour le DBL

Sûreté de fonctionnement : mode dégradé utilisant l’angle au volant

Pour prendre en compte les pertes de GPS, un mode dégradé (sûreté de fonctionnement) a été envisagé. S’il n’y a pas d’information de la navigation (indice de confiance en dessous d’une certaine valeur) un passage en DBL basé sur l’angle au volant est fait. Les résultats d’un tel mode dégradés sur des virages quelconques sont montrés sur les figures Figure 5-45 et Figure 5-46. Une création de défauts dans la navigation menant à une perte de positionnement se traduit par une prise en compte de l’information de l’angle au volant par notre système. Sinon, il prend celle de la navigation (capteur virtuel d’horizon glissant évènementiel).

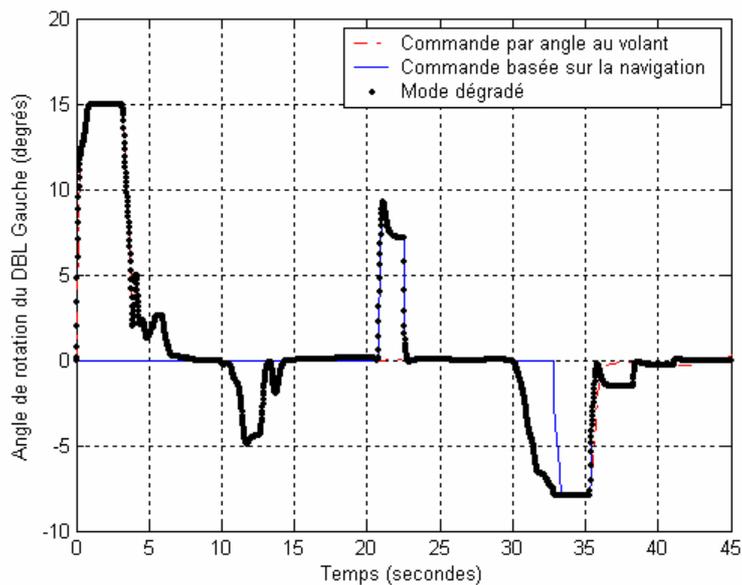


Figure 5-45 : Résultat de rotation en mode dégradé du DBL gauche

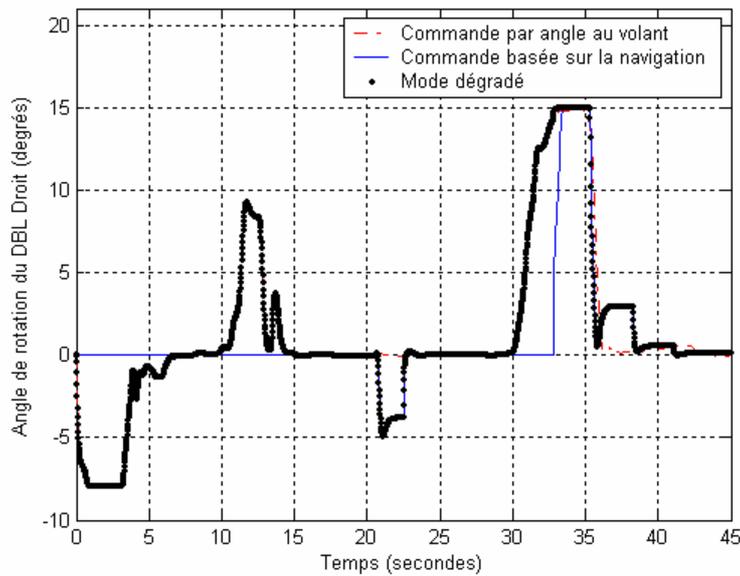


Figure 5-46 : Résultat de rotation en mode dégradé du DBL droit

Utilisation de la vitesse du véhicule

Ishiguro et Yamada [166] ont mené une étude pendant laquelle ils ont mesuré les points de fixation sur lesquels le conducteur se focalise dans un virage et ils ont utilisé les résultats de ces mesures pour la conception d'une logique de contrôle AFS. Pour cela, ils ont effectué des essais sur un circuit contenant plusieurs virages de rayons de courbure différents à des vitesses différentes. Un instrument de mesure des mouvements des yeux a été utilisé (« Eye Mark Recorder ») pour l'étude du comportement visuel des différents conducteurs qui ont participé à des essais de jour et de nuit. Ces essais avaient pour objectif d'une part de mesurer la distribution des points de fixation du conducteur dans les virages en conduite diurne et nocturne et d'autre part de déterminer la relation entre la vitesse du véhicule et le point de regard.

A partir de ces essais, ils ont proposé une loi de commande d'éclairage automobile AFS en courbe (« Bending Light »). Son principe consiste à augmenter l'angle de pivotement des phares (éclairage parallèle) suivant la vitesse du véhicule (cf. Figure 5-47) selon l'équation suivante :

$$\omega = \left(\frac{180^\circ}{\pi} \right) \left(\frac{Vt}{2R} \right) \quad \text{Équation 5-1}$$

Où ω : angle de pivotement des phares, V : vitesse du véhicule, R : rayon de courbure du virage (estimé en fonction de la rotation des roues du véhicule) et t est le temps nécessaire au véhicule pour atteindre l'endroit à illuminer. Le paramètre « t » a été pris égal à 3 secondes, valeur suffisante pour envisager une éventuelle manoeuvre d'évitement. L'information de courbure de la route est estimée à partir des paramètres du véhicule (facteur de stabilité, l'empattement, la vitesse et l'angle des roues avant du véhicule).

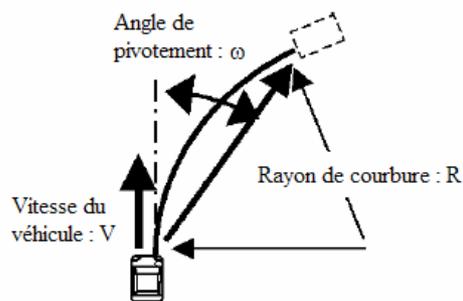


Figure 5-47 : Angle de pivotement correspondant à V et R

En effet, pour les deux virages de la Figure 5-42, en plus du capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel, la vitesse du véhicule a été ajoutée en appliquant cette loi de commande proposée par Ishiguro et Yamada [166]. Le paramètre a été pris égal à 1.5 secondes et l'information de courbure est celle issue du système de navigation par anticipation (du virage en amont du véhicule). Il faut bien noter que cette information de vitesse est prise en compte dans la valeur de rotation du DBL et non pas dans l'activation du DBL (c'est-à-dire le moment d'activer le DBL n'est pas en fonction de la vitesse mais en fonction de la distance par rapport au virage). Les résultats de rotation des DBL gauche et droit pour cette loi sont montrés sur les figures Figure 5-49 et Figure 5-50. Le profil de vitesse du véhicule pour ces deux virages est montré sur la Figure 5-48.

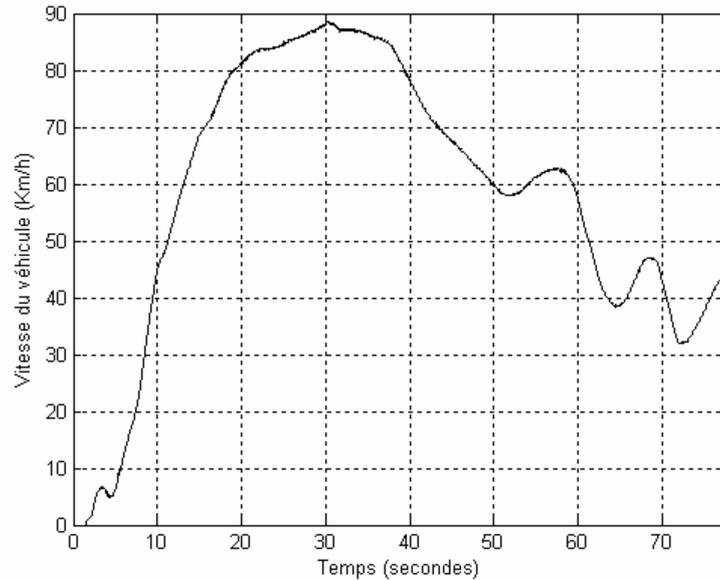


Figure 5-48 : Vitesse du véhicule pour les deux virages de la Figure 5-42

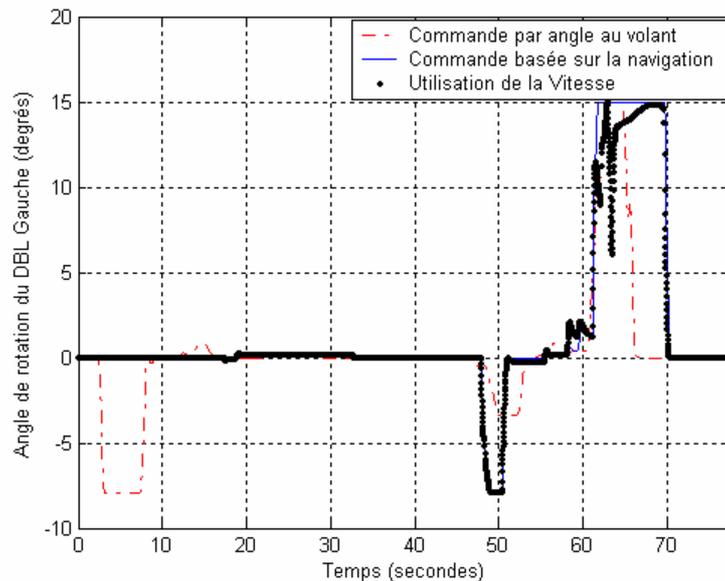


Figure 5-49 : Rotation du DBL gauche avec utilisation de la vitesse

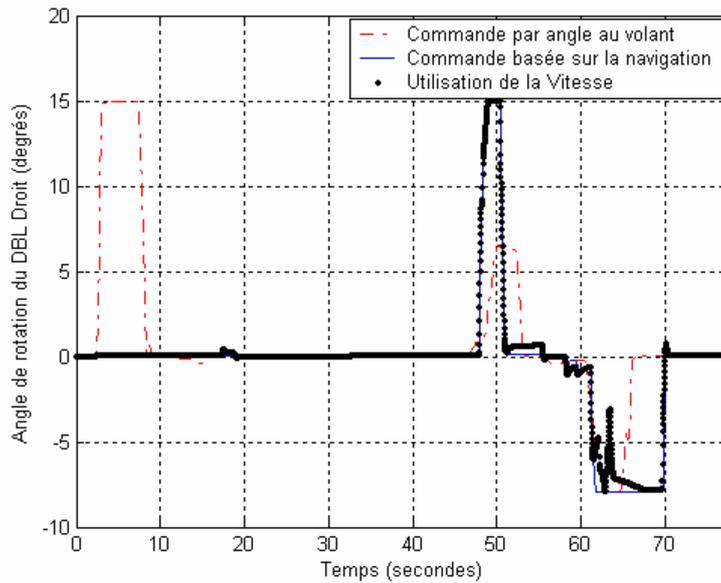


Figure 5-50 : Rotation du DBL droit avec utilisation de la vitesse

5.7. Généralisation du concept : Application à la détection des limitations de vitesse

Le capteur de détermination des situations de conduite a été initialement développé pour l'optimisation de l'éclairage AFS. Ce capteur est un capteur générique pour la détermination des situations de conduite. Ce capteur peut être utilisé pour n'importe quel système d'aide à la conduite qui sont généralement basés sur la perception. On peut citer plusieurs exemples de généralisation de l'utilisation de ce capteur. Un de ces exemples consiste à l'utiliser pour l'optimisation de l'éclairage DBL dans le but d'avoir une information anticipative et plus précise de la courbure de la route en amont du véhicule. Ceci peut être fait en prenant la courbure calculée par un système à base de vision et la courbure extraite du système de navigation ou calculée à travers les coordonnées X et Y des point de l'horizon électronique. Le système de calcul anticipatif de la courbure à base de la vision a été déjà développé à Valeo. Celui basé sur un système de navigation a été développé dans le cadre de notre capteur virtuel d'horizon glissant événementiel. Un autre exemple d'application du capteur de détermination des situations de conduite est celui de la détermination précise des limitations de vitesse réglementaires SLS (Speed Limit Support). En effet, chaque système pris indépendamment : le système de navigation et le système à base de vision présente des inconvénients de précision et de disponibilité des informations. Ces inconvénients sont détaillés dans le chapitre 3.

Les systèmes de limitations de vitesse ont vu le jour en vue de réduire les accidents concernant les vitesses excessives. En effet, de nombreux conducteurs ne respectent pas les vitesses réglementaires. Selon les statistiques, 40% des conducteurs ne les respectent pas sur autoroutes, 60% sur les routes nationales et départementales et 25% dépassent la vitesse réglementaire en ville par plus de 10 km/h [102]. L'introduction du *Speed Limit Support* ou l'avertisseur des limitations des vitesses réglementaires devrait réduire le nombre d'accidents et contribuer à l'amélioration de la sécurité routière. Le *Speed Limit Support* est un système d'aide à la conduite qui informe le conducteur sur la limitation de vitesse de la route empruntée pour l'aider à ne pas la dépasser. Il viendrait compléter le limiteur de vitesse manuel, déjà commercialisé sur certains véhicules.

Dans cette section nous allons présenter les résultats de généralisation du capteur de détermination des situations de conduite à ce système d'aide à la conduite (ADAS).

Pour ce système d'aide à la conduite (*Speed Limit Support*), le diagramme ^{RT}Maps[®] utilisé pour des essais réels est montré sur la Figure 5-51. L'acquisition des images de la caméra se fait à travers le module « Acq12Bits ». Un développement spécifique a été fait pour extraire les différentes informations du système de navigation (Limitation de vitesse et les critères de la navigation). Une communication a été développée pour le transfert des données du système de navigation ADASRP

vers ^{RT}Maps[®]. Elle est représentée par le module « adasrp_eh » sur la figure. Une fois les deux systèmes lancés (ADASRP et RTMaps) un nouveau module (composant) se crée automatiquement. Il est montré sur la Figure 5-52 sous le nom « COMStub.adasrp_eh.input ».

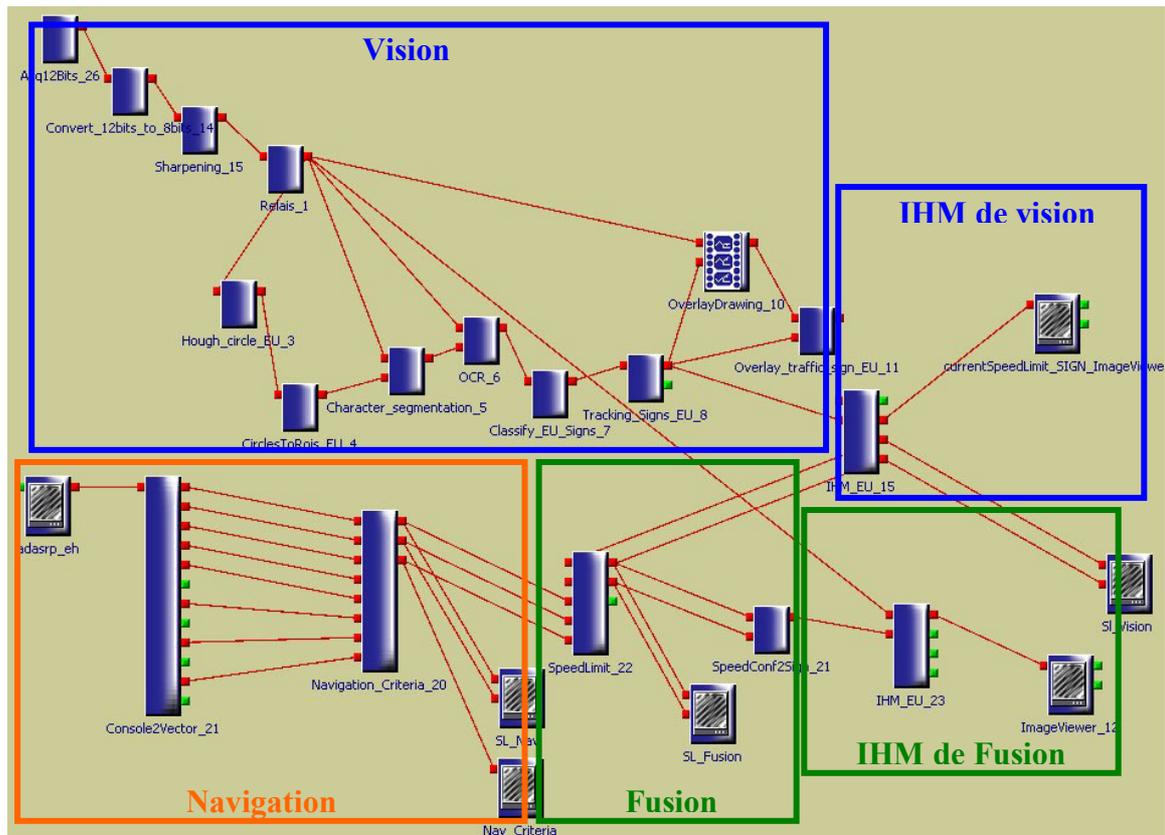


Figure 5-51 : Diagramme ^{RT}Maps[®] des essais réels pour le système SLS

Pendant des essais réels de ce système de fusion, plusieurs cas évoqués déjà, dans les inconvénients de chaque système pris indépendamment (la navigation et la vision), dans le chapitre 3 ont été rencontrés. Le comportement du système de fusion était conforme aux objectifs lui y sont fixés. Les résultats pour les différents cas sont présentés sur les figures ci-après.

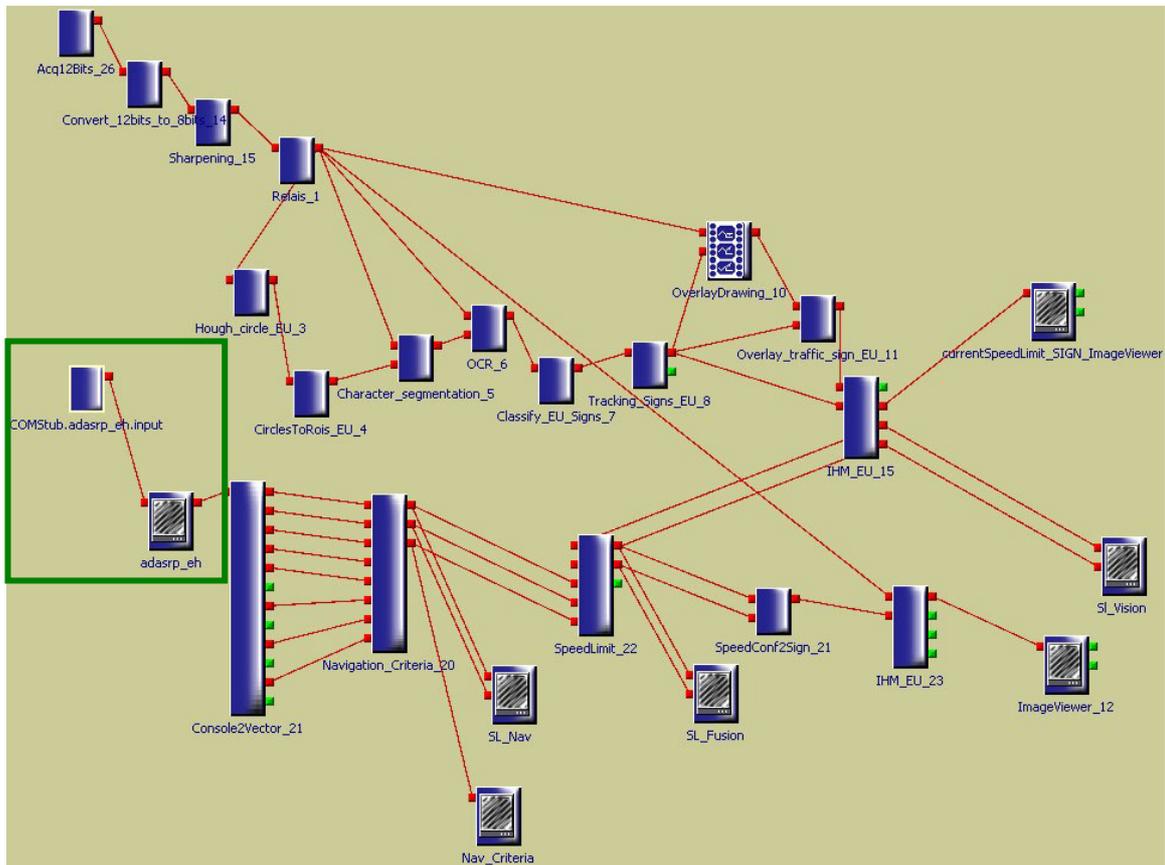


Figure 5-52 : Communication entre ADASRP et RTMaps pour le système SLS

Dans le cas d'une sortie d'autoroute, nous avons rencontré un cas où le système de vision détecte le panneau de limitation de vitesse destiné aux conducteurs sortants de l'autoroute (90 km/h). Le système de navigation reste sur le chemin le plus probable (Most Likely Path) qui est sur l'autoroute. Il donne le critère « Route Européenne » qui est l'équivalent de l'autoroute comme type de route (cinquième critère à « 7 ») et une limitation de vitesse correspondant au segment actuel de l'autoroute qui est à 110 km/h. Par conséquent, le système de fusion SLS (cf. Figure 5-53) affiche sur son IHM le panneau du résultat de fusion qui est le 110 km/h avec un indice de confiance de 0.87.



Figure 5-53 : Résultats du système SLS en sortie d'autoroute

Nous avons également rencontré un cas où le système de navigation détecte un panneau qui n'est pas conforme à celui sur la route. Ce type de cas peut être dû au manque de réactualisation de la cartographie du système de navigation, au positionnement, etc. Les résultats pour cette situation sont montrés sur la Figure 5-54. Sur cette figure, le système à base de vision détecte le bon panneau qui est celui d'une limitation de vitesse à 110 km/h avec un indice de confiance de 0.99. Le système de navigation détecte une limitation de vitesse à 50 km/h avec un indice de confiance de 0.60 avec comme critère route nationale (quatrième critère de la navigation « Nav_Criteria » égal à 9). Le système de fusion donne un résultat de fusion correspondant au panneau de limitation de vitesse à 110 km/h avec un indice de confiance de 0.75.



Figure 5-54 : Résultats du système SLS une fausse détection de la navigation

Sur la Figure 5-55 sont présentés les résultats du cas où les deux systèmes de vision et de navigation sont en total accord avec les mêmes panneaux détectés (90 km/h) et des indices de confiance très élevés (0.99 et 1 respectivement). Le système de navigation confirme ce résultat avec le critère « autoroute » (quatrième critère à « 7 » représentant une route Européenne et équivalent à « autoroute »). Le système de fusion dans cas donne le même résultat avec une limitation de vitesse à 90 km/h et un indice de confiance de 0.89. Cet indice de confiance moins élevé que ceux donnés par les deux systèmes est dû au fait que la navigation donne un critère de « pas de mode guidage » pour lequel nous baissons les masses de croyance dans la table des croyances de la navigation présentée dans le chapitre 3.

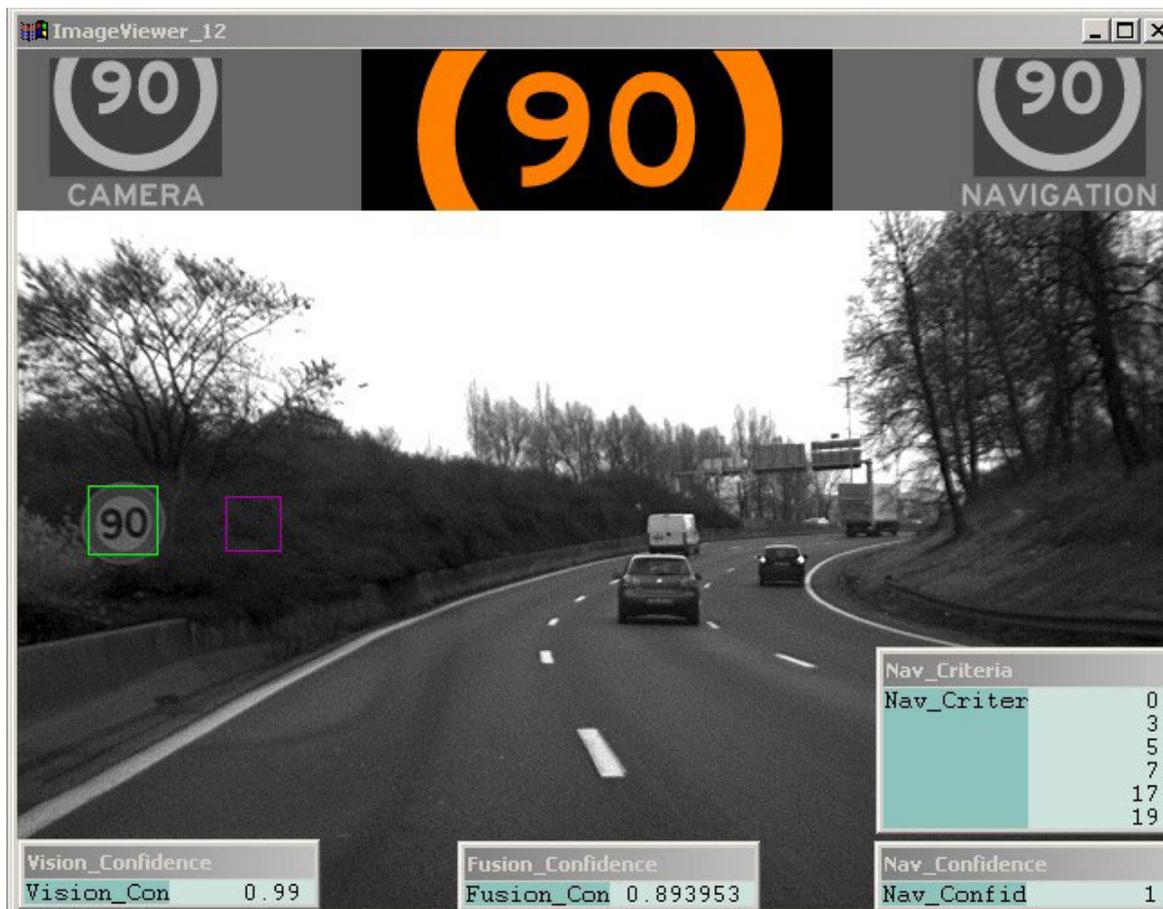


Figure 5-55 : Résultats du système SLS avec la vision et la navigation en accord total

Les résultats du cas d'un accord partiel entre les deux systèmes sont montrés sur la Figure 5-56. Le système à base de vision détecte un panneau de 70 km/h avec un indice de confiance de 0.65. Le système de navigation, quant à lui, il détecte une limitation de vitesse à 70 km/h avec un indice de confiance de 1. Il faut rappeler que cet indice est celui du « Most Likely Candidate Probability » qui n'est pas un indice de confiance proprement dit. Par conséquent, le système de fusion SLS donne un résultat de limitation de vitesse à 70 km/h avec un indice de confiance élevé ayant une valeur de 0.87.

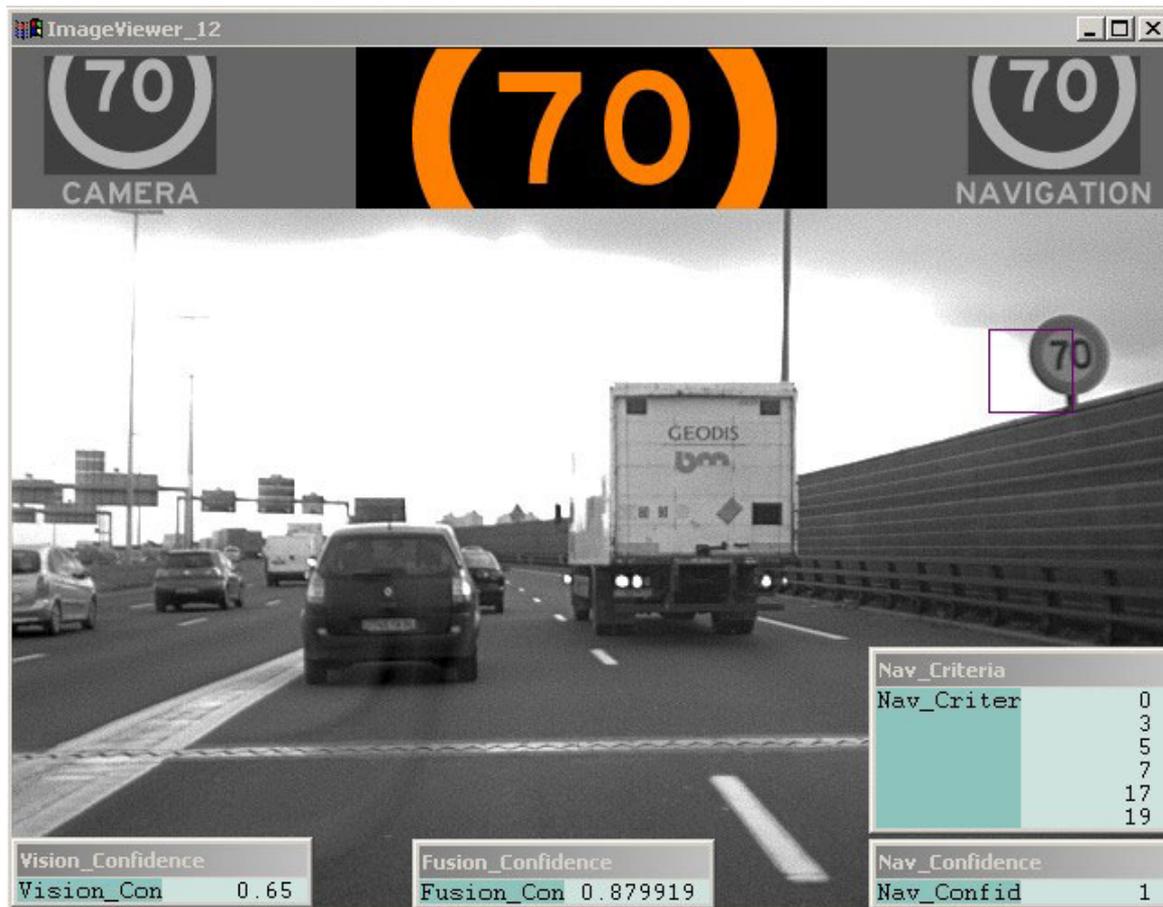


Figure 5-56 : Résultats avec la vision et la navigation en accord partiel

5.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la validation des deux capteurs virtuels développés. Pour cette validation nous avons suivi la méthode du cycle en V qui est la méthode la plus populaire en industrie. Cette validation a été faite en simulations SIL (Simulations In the Loop), en temps-réel simulé, en simulations HIL (Hardware In the Loop), et en conditions réelles avec des essais réels sur un véhicule expérimental. Les essais réels ont été effectués sur des routes ouvertes avec différentes situations de conduite. Les deux capteurs développés ont été appliqués à l'optimisation de l'éclairage AFS. Une généralisation du capteur générique de détermination des situations de conduite a été faite par son application à un système d'aide à la conduite (ADAS) de détermination des limitations de vitesse réglementaires SLS (Speed Limit Support). Pendant les différentes étapes de la validation, nous avons montré que ces deux capteurs développés permettent d'améliorer l'éclairage AFS et qu'ils sont généralisables pour d'autres systèmes d'aide à la conduite. Nous avons également montré que ces deux capteurs permettent de pallier aux problèmes connus du système de navigation et du système à base de vision. Les problèmes du système de navigation incluant, entre autres, son aspect ponctuel ont été corrigés avec le capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel. Quand aux problèmes du système à base de vision, ils ont été corrigés par sa fusion avec le système de navigation en utilisant la théorie des croyances. Ceci a été illustré sur des situations de conduite présentant les différents problèmes rencontrés avec les deux systèmes (navigation et vision) et il a été montré que ces problèmes ne sont plus présents avec les deux capteurs virtuels développés.

Conclusion générale

Conclusions

De part l'augmentation de sa densité, le trafic routier est devenu, ces dernières années, de plus en plus dangereux. Ceci explique la démarche des constructeurs et équipementiers consistant à augmenter les fonctionnalités des véhicules par des systèmes d'assistance à la conduite en termes de sécurité mais également de confort. C'est dans cette thématique que s'inscrivent les travaux présentés dans ce mémoire. Cette assistance se base essentiellement sur l'amélioration des moyens de perception de l'environnement d'évolution du véhicule. Pour améliorer cette perception de l'environnement, les systèmes d'informations géographiques peuvent être utilisés. Ils apportent des informations sur le profil routier et disposent d'informations contextuelles (ouvrages d'art, nature de la route, rayon de virage, limitation de vitesse, etc.). Ils offrent ainsi, en plus des autres systèmes d'aide existants, la possibilité de garantir une anticipation de la perception de l'environnement et d'adapter l'assistance à la géométrie de la route. Cette approche rentre dans le cadre du projet NAFS visant à améliorer la sécurité en fournissant un éclairage optimal au conducteur selon la géométrie de la route et par anticipation. Elle consiste en la détermination des situations de conduite afin d'optimiser l'éclairage AFS en fonction de ces situations. La stratégie développée est fondée sur l'utilisation et la fusion des signaux de plusieurs capteurs (système de navigation, caméra, autres capteurs endogènes). Deux capteurs virtuels ont également été développés dans le cadre de cette thèse afin d'améliorer l'efficacité des commandes réalisées. Un capteur d'horizon glissant événementiel basé sur les informations de la navigation met en œuvre un automate d'états finis pour pallier le problème de la nature ponctuelle de ces informations. Un deuxième capteur virtuel réalise la détermination des situations de conduite en utilisant la fusion multicapteurs des informations de la navigation avec celles issues d'un système à base de caméra. L'utilisation de quelques critères du système de navigation a permis de construire un indice de confiance de celui-ci.

Le premier chapitre a introduit la sécurité et le confort routiers ainsi que l'apport des systèmes d'assistance à la conduite en prenant en compte les trois éléments intervenant dans la phase de conduite : le conducteur, le véhicule et l'environnement. Pendant cette tâche de conduite, le conducteur perçoit un grand nombre d'informations du véhicule et de son environnement. Il a été montré que le conducteur a surtout besoin d'une assistance à la conduite pendant la phase de perception d'où l'intérêt des systèmes d'assistance à la conduite visant à améliorer cette perception.

Le deuxième chapitre a été consacré au projet NAFS qui vise à améliorer l'éclairage AFS en utilisant un système de navigation. Ses objectifs ont été détaillés ainsi qu'un état de l'art des systèmes de navigation ou d'informations géographiques. Un état de l'art de l'éclairage AFS a été présenté dans ce chapitre, notamment les travaux récents visant à l'améliorer. L'anticipation recherchée a été assurée par l'utilisation des systèmes d'informations géographiques. A partir de cet état de l'art, une structure s'est dégagée et les différentes situations de conduite avec leur stratégie d'éclairage associée ont été identifiées. Une étude de sûreté de fonctionnement a été effectuée afin d'avoir un éclairage optimisé et sécurisant.

L'utilisation de la seule navigation n'est pas suffisante du fait de ses limitations liées au positionnement par GPS et à la précision de représentation de sa cartographie. Ceci montre la nécessité d'utilisation de capteurs virtuels pour développer des assistances à la conduite plus efficaces et plus sûres. Pour cette raison, le troisième chapitre donne les éléments nécessaires à la considération de capteurs virtuels et de fusion des données.

L'utilisation de la fusion de données est motivée par l'utilisation de plusieurs capteurs hétérogènes, complémentaires et redondants. Dans cette optique, les deux capteurs virtuels développés sont détaillés dans le quatrième chapitre avec leur application à l'optimisation de l'éclairage AFS (projet NAFS). La

performance de ces capteurs virtuels développés a été évaluée en simulation et en conditions réelles en utilisant un véhicule expérimental dédié (équipé lors de la thèse).

Leur application à l'optimisation de l'éclairage AFS a été également évaluée en simulation et en conditions réelles. Cette évaluation fait l'objet du cinquième chapitre. Le capteur virtuel de détermination de situations de conduite basé sur la fusion de la navigation et du système à base de caméra a été montré généralisable du fait de son caractère générique. Cette généralisation a été testée en conditions réelles sur le système de détermination des limitations de vitesse. Les deux systèmes optimisés (éclairage AFS et détection des limitations de vitesse) en utilisant les deux capteurs virtuels développés dans cette thèse ont été présentés à des constructeurs automobiles (PSA, Audi, Renault, Honda, etc.) ainsi que lors de plusieurs « techdays ».

Perspectives

Les perspectives d'évolution du projet NAFS sont nombreuses. Dans un premier temps, pour le capteur virtuel d'horizon glissant évènementiel, concernant la phase de conduite en virage, l'information de courbure peut être améliorée. Ceci peut être réalisé en faisant la fusion de la courbure calculée par un système basé sur la vision et celle issue du système de navigation. Ce qui permettra une détermination plus précise de la courbure nécessaire à l'éclairage en courbe DBL. D'ailleurs, une première approche a été utilisée dans les travaux de cette thèse pour pallier à ce problème de précision. Elle concerne la génération d'une trajectoire en utilisant les polynômes polaires. Cette méthode est basée sur des informations calculées (rayon de courbure et secteur angulaire) sur la base d'une courbure fournie par le système de navigation utilisé (ADASRP). Or, cette courbure est calculée en temps réel dans ce système en utilisant une méthode basique (méthode dite des trois points). Celle-ci a été optée par NAVTEQ car les autres méthodes (splines, courbes de Bézier, etc.) nécessitent une capacité de calcul énorme. Le calcul de l'information de courbure par une autre méthode pourrait donc améliorer la précision pour la commande d'éclairage en virage DBL. Cette piste pourrait être envisagée pour la suite de ces travaux. En plus, une individualisation de la commande d'éclairage en virage DBL, basée sur la trajectoire par polynômes polaires, peut être également envisagée pour tenir compte du comportement du conducteur (débutant, expérimenté, etc.).

Pour le capteur de détermination de situations de conduite, les critères du système de navigation qui ont été utilisés dans la construction d'un indice de confiance des informations de ce dernier ont été définis par expérience. L'utilisation d'autres critères pourrait permettre de rendre encore plus fiable cet indice de confiance. D'autre part, les développements effectués pour ce capteur ne tenaient pas compte des informations signalant les travaux ou les panneaux de limitation de vitesse variables. Or, les informations de TMC (« Traffic Messaging Channel ») peuvent être de grande utilité pour fiabiliser encore ce capteur. Cette information n'étant pas disponible dans le système de navigation utilisé (ADASRP), une utilisation dans un premier temps d'un capteur RLT (« Rain Light Tunnel ») peut être envisagée. Avec cela, l'information du capteur de lumière, permet de tenir compte des panneaux variables entre jour et nuit. En outre, le capteur de pluie permet quant à lui de tenir compte des limitations de vitesse par temps de pluie. L'information de temps universelle du GPS peut être également utilisée pour les limitations de vitesse qu'on trouve généralement en Allemagne et qui tiennent compte des plages horaires.

En terme d'application de ce capteur, la limitation de vitesse fusionnée et résultante peut être utilisée comme une consigne dans un régulateur de vitesse adaptatif ACC (« Adaptive Cruise Control »).

Une généralisation de ce capteur générique à d'autres systèmes d'assistance à la conduite ADAS est tout à fait envisageable : citons, par exemple, un système de détection de panneaux de direction en utilisant un système de vision permettant de détecter ce type de panneaux et un système de navigation où l'on extrait le nombre de voies dans une route.

Le développement des deux capteurs virtuels a été réalisé avec l'objectif d'une meilleure perception de l'environnement géographique selon un horizon défini, pour l'optimisation de l'éclairage AFS. Les développements des deux capteurs virtuels ont été réalisés sur la base d'un système de navigation de

recherche (ADASRP de NAVTEQ). L'utilisation d'un système de navigation de série permet de mieux rendre compte des différentes contraintes d'utilisation de tels dispositifs. Une étude qui a été commencée en collaboration avec PSA est en cours. Elle concerne l'utilisation de leur système de navigation de série pour l'optimisation de l'éclairage en virage DBL. Par ailleurs, l'intégration supplémentaire d'un capteur de proximité pour la détection d'obstacles dynamiques (radar, lidar ou autre) permet de tenir compte de l'environnement dynamique du véhicule et d'augmenter les potentialités de ces deux capteurs.

Enfin, l'idée de fusion des informations d'un système de navigation avec celles issues d'un système à base d'une caméra, ouvre de multiples voies d'applications : citons pour exemple l'optimisation de l'éclairage AFS avec la détection de la pente (« Slope »). Cette application peut être envisagée avec comme objectif le remplacement des capteurs d'assiette pour la correction dynamique d'éclairage à base d'optiques en Xénon. D'autres applications peuvent par exemple concerner la détection de voie pour le système LDWS (« Lane Departure Warning System ») ou pour le système de maintien dans la voie (« Lane keeping »), etc. Les applications de ce type sont nombreuses et l'utilisation de tels capteurs virtuels pourra également permettre de fiabiliser ces applications.

Bibliographie

Première partie : chapitres 1 et 2

- [1] Abuhadrous I., *"Système Embarqué Temps Réel de Localisation et de Modélisation 3D par Fusion Multi-Capteur"*, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2005.
- [2] Afonso J., Brandelon B., Huerre B., Sa Da Costa J. M. G., *"Modélisation du Comportement d'un Conducteur Désirant Suivre une Trajectoire"*, Congrès international de la Société des Ingénieurs Automobile, 1993.
- [3] Apostoloff N., Zelinsky A., *"Vision In and Out of Vehicles: Integrated Driver and Road Scene Monitoring"*, International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 4-5, 513-538, 2004.
- [4] Basset M., *"Le conducteur routier - La voiture intelligente"*, Chapitre 3, sous la direction de G. Gissinger et N. LE Fort-Piat, Editions Hermès, ISBN 2-7462-0512-2, 2002.
- [5] Basset M., Baujon J., Gissinger G.L., *"Intelligent Driver Aid System based on Trajectory Reconstruction for Active Safety"*, IFAC World Congress, paper 8b-017 in IFAC-IS-8b-001, Beijing, 5-9 July, 1999.
- [6] Baujon J., Basset M., Gissinger G. L., *"Etude du comportement visuel d'un conducteur désirant suivre une trajectoire"*, IEEE CIFA'2000, Lille, pp 306-311, 5-8 juillet 2000.
- [7] Bonnifait P., *"Contribution à la localisation dynamique d'automobiles. Application à l'aide à la conduite"*, HDR (Habilitation à Diriger des Recherches), Université de Technologie de Compiègne, 2005.
- [8] Botton S., Duquenne F., Egels Y., Even M., Willis P., *"GPS Localisation et Navigation"*, Editions Hermès, ISBN 2-86601-570-3, 1997.
- [9] Brackstone M., Waterson B., *"Are We Looking Where We Are Going? An Exploratory Examination of Eye Movement in High Speed Driving"*, Proc. of the 83rd Transportation Research Board Annual Meeting. Paper 04-2602, CD-ROM. TRB, Washington, D.C. U.S.A. Jan. 11-15, 2004.
- [10] Caroux J., *"Optimisation des lois de commande d'éclairage automobile par fusion de données"*, Mémoire de DEA, Université de Haute – Alsace, 2003.
- [11] Chikhi F., *"Système Prédictif et Préventif d'Aide à la Conduite"*, Thèse de Doctorat, Université de Versailles Saint Quentin Yvelines, 2006.
- [12] Dang An Ninh C., *"Contribution au diagnostic et à la classification du conducteur d'un véhicule routier par des méthodes floues"*, Thèse de Doctorat, Université de Haute – Alsace, N° d'ordre 2000MULH0608, 2000.
- [13] Dillies-Peltier M-A., Le Fort-Piat N., *"Les Systèmes d'Aide à la Conduite - La voiture intelligente"*, Chapitre 4, sous la direction de G. Gissinger et N. LE Fort-Piat, Editions Hermès, ISBN 2-7462-0512-2, 2002.
- [14] Dubrovin A., Lelevé J., Prevost A., Canry M., Cherfan S., Lecoq P., Kelada J. M., Kemeny A., *"Application of real-time lighting simulation for intelligent front-lighting studies"*, Proceedings of the Driving Simulation Conference, pp.333-343, Paris, September 2000.
- [15] Ehrlich J., Marchi M., Saad F., Sauvagnac P., Salesse L., Jarri P., Guichon D., Lassarre S., Page Y., *"Limitation Adaptative de Vitesse : Le Projet LAVIA"*, Congrès International ATEC, Paris, 2003.
- [16] El Badaoui El Najjar M., *"Localisation dynamique d'un véhicule sur une carte routière numérique pour l'assistance à la conduite"*, Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2003.
- [17] European Commission, *"Results from the Transport Research Programme"*, Office for Official Publications of the European Communities, ISBN 92-894-1552-5, 2001.
- [18] Frank J., *"Modélisation de la géométrie routière et assistance à la conduite"*, Mémoire d'ingénieur, ESGT, le Mans France, réalisé au Laboratoire de Topométrie, EPFL, 2005.

- [19] Gilliéron P. Y., Gontran H., Merminod, B., *"Cartographie routière précise pour les systèmes d'assistance à la conduite"*, GIS-SIT, 2006.
- [20] Gilliéron P. Y., Konnen J., *"Enhanced Navigation System for Road Telematics"*, STRC03 3rd Swiss Transport Research Conference, Monte Verità/Ascona, March 19-21, 2003.
- [21] Gilliéron P.Y., Waegli A., *"Galileo et le prix de la mobilité"*, Journal Route et Trafic, Editeur VSS, No. 3, pp.19-22, 2005.
- [22] Gissinger G. L., Le Fort-Piat N., *"La Voiture Intelligente"*, Hermès Science Publications, Paris, ISBN 2-7462-0512-2, 2002.
- [23] Gning El Hadji A., *"Localisation Garantie d'Automobiles. Contributions aux Techniques de Satisfaction de Contraintes sur les Intervalles"*, Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2006.
- [24] Gustafsson F., *"Sensor Fusion for Accurate Computation of Yaw Rate and Absolute Velocity"*, SAE Technical Paper N° 2001-01-1064, 2001.
- [25] Gustafsson F., *"Virtual Sensors of Tire Pressure and Road Friction"*, SAE Technical Paper N° 2001-01-0769, 2001.
- [26] Hadj-Mabrouk A., Hadj-Mabrouk H., Dougui M., *"Chronobiologie de la Vigilance, Approche d'Application dans le Domaine de la Sécurité Routière"*, Recherche Transport Sécurité N° 73, pp. 03-26, 2001.
- [27] Hamm M., Rosenhahn E-O., *"System Strategies and Technology for Improved Safety and Comfort with Adaptive Headlamps"*, SAE Technical Paper N° 2001-01-0299, SAE World Congress, Detroit, Michigan, March 5-8, 2001.
- [28] Houtenbos M., Jagtman H.M., Hagenzieker M.P., Wieringa P.A., Hale A.R., *"Understanding road users' expectations: an essential step for ADAS development"*, European Journal of Transport and Infrastructure Research 5 (4). pp. 253-266, 2005.
- [29] <http://www.adase2.net/>
- [30] <http://www.afis.fr/prabout/surfonct/surfonct.html>
- [31] <http://www.arcos2004.com/>
- [32] <http://www.benomad.com>
- [33] <http://www.carsense.org/>
- [34] <http://www.ertico.com/en/activities/activities/nextmap.htm>
- [35] <http://www.ertico.com/en/subprojects/actmap/>
- [36] <http://www.esri.com>
- [37] <http://www.eu-projects.com/roadsense/>
- [38] <http://www.ign.fr>
- [39] <http://www.navigon.com/>
- [40] <http://www.prevent-ip.org>
- [41] <http://www.tls.cena.fr/divisions/SDF/Public/DocsHTML/glossaire.html#Maintenabilite>
- [42] <http://www.wikipedia.org/>
- [43] <http://www-sop.inria.fr/mobivip/>
- [44] Ishiguro K., Yamada Y., *"Control Technology for Bending Mode AFS"*, SAE Technical Paper N° 2004-01-0441, SAE World Congress, Detroit, Michigan, March 8-11, 2004.
- [45] Ji Q., Yang X., *"Real-Time Eye, Gaze, and Face Pose Tracking for Monitoring Driver Vigilance"*, Real-Time Imaging, 8, pp. 357-377, 2002.
- [46] Khardi S., Hernandez-Gress N., *"Validation d'un Nouveau Système Hybride de Diagnostic de l'Etat de Vigilance du Conducteur"*, Recherche Transport Sécurité N° 66, pp. 101-112, 2000.
- [47] Kitajima M., Akamatsu M., *"Ocular Movement During Curbside Turns At Intersections"*, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting, pp. 1885-1889, 2003.
- [48] Kondo M., Ajimine A., *"Driver's Sight Point and Dynamics of the Driver-Vehicle-System Related to It"*, SAE Technical Paper N° 680104, 1968.
- [49] Konnen J., Gilliéron P. Y., *"Systèmes de navigation de haute précision pour l'automobile"*, Mensuration, Photogrammétrie, Génie rural, vol. a (2002), p. 508-511, 2002.

- [50] Land M. F., Tatler B. W., *"Steering with the Head : the Visual Strategy of a Racing Driver"*, Current Biology, 11:1215-1220, 2001
- [51] Lauffenburger J. P., *"Contribution à la surveillance temps-réel du système «conducteur – véhicule – environnement» : élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite"*, Thèse de Doctorat, Université de Haute – Alsace, N° d'ordre 02MULH0706, 2002.
- [52] Lauffenburger J. P., Petitjean C., Basset M., Perronne J. M., *"NAICC: an Embedded Architecture for Driver Assistance Systems Design"*, IEEE IV2003, Intelligent Vehicles Symposium, OHIO, USA, 9 – 11 June, 2003
- [53] Laurin E., *"Système Intelligent d'Assistance à la Perception dans la Conduite de Véhicule"*, Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 2000.
- [54] Majjad R., Kiencke U., Husson R., *"Design of a hybrid driver model"*, SAE Special Publications 1358, SAE Paper N° 980017, 1998.
- [55] Mammari S., Glaser S., Netto M., Minoiu N., *"Le temps à sortie de voie : une mesure et un critère pour l'assistance au contrôle latéral"*, IEEE CIFA'2006, Bordeaux, 30 Mai – 01 Juin 2006.
- [56] Mammari S., Martinet P., Glaser S., Netto M., Nouvelière L., Thuilot B., *"Méthodes de l'automatique pour l'assistance et l'automatisation de la conduite automobile"*, Journées Nationales de la Recherche en Robotique, JNRR'05, Guidel, Octobre 2005.
- [57] Mourllion B., *"Perception et Localisation Collaboratives à partir de Données Imprécises et incertaines"*, Mémoire de DEA, Université de Technologie de Compiègne, 2003.
- [58] Nagata M., Kuriyama H., *"Visual Behaviour of Novice and Experienced Drivers"*, SAE Technical Paper N° 820415, 1982.
- [59] Navigation Technologies, *"Navigation Technologies ADASRP: Advanced Driver Assistance Systems Research Platform, Version 3.8"*, User Manual, July 2003.
- [60] Navteq, *"ADASRP 2006, Version 2.11"*, User's Manual, June 2006.
- [61] Opgen-Rhein P., Bertram T., Seuss J., Karas P., Strychik D., *"A Hardware-In-the-Loop based Process Improves Quality and Decreases the Development Period of Dynamic Headlamp Levelling System"*, 3rd IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Sydney, Australian, 6-8 September, 2004.
- [62] Pandazis J. –C., *"NextMap for Transport Telematics Applications – Final Report"*, ERTICO, 2002.
- [63] Pinto Ribeiro R., *"Système de Commande Prédictive pour Projecteurs Directionnels"*, Mémoire d'ingénieur, Ecole Supérieure de Conception et de Production Industrielles, 2003.
- [64] Polychronopoulos A., Tsogas M., Amditis A., Etemad A., *"Extended Path Prediction Using Camera and Map Data for Lane Keeping Support"*, IEEE Intelligent Transportation Systems ITS, pp. 166-171, 2005.
- [65] Rasmussen J., *"Skills, Rules And Knowledge; Signals, Signs And Symbols And Other Distinctions In Human Performance Models"*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 13, N° 3, pp. 257-266, 1983.
- [66] Renault S., Le Meur A., Meizel D., *"Localisation à partir d'Informations GPS, Odométriques et Cartographiques par Estimation Ensembliste dans une Formulation Floue"*, IEEE CIFA'2006, Bordeaux, 30 Mai – 01 Juin 2006.
- [67] Ress C., Etemad A., Hochkirchen T., Kuck D., *"Electronic Horizon – Supporting ADAS Applications with Predictive Map Data"*, ITS European Congress, Hannover, Germany, June 2005.
- [68] Revue A., *"Contribution des Systèmes d'Informations Géographiques à la Sécurité Routière : Approche Multicapteurs pour l'Evaluation de Configurations à Risques"*, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [69] Rothengatter J.A., Alm H., Kuiken M. J., Michon J.A., Verwey W. B., *"The driver, Generic Intelligent Driver Support"*, Taylor & Francis Editions, 1993.
- [70] Rudolf B., Schmidt J., Grimm M., Kalze F.-J., Wördenweber B., Lecocq P., Kemeny A., Panerai F., *"Integration of AFS-functionality into driving simulators"*, Proceedings of the Driving Simulation Conference, Paris, pp 155-165, September 2004.
- [71] Salahuddin Khan M, Roser Herbst M., *"The Significance of Navigation Map Databases in Advanced Driver Systems and Dynamic Route Guidance"*, SAE Technical Paper N° 2000-01-C076, 2000.

- [72] Saroldi A., Ansaldi E., Sidoti C., Miglietta M., *"Describing Human Driving Behaviour"*, IEEE International Conference on Intelligent Vehicles, 1998.
- [73] Schlingelhof M., Krajzewicz D., Kühne R., "New GNSS-based Approaches for Advanced *Driver Assistance Systems*", TRB 85th Annual Meeting, Washington, USA, January 22-26, 2006.
- [74] Shinar D., McDowell E. D., Rockwell T. H., *"Eye movements in curve negotiation"*, Human Factors, Vol. 19, N° 1, pp. 63-71, 1977.
- [75] Sivak M., Schoettle B., Flannagan M. J., Minoda T., *"Optimal Strategies for Adaptive Curve Lighting"*, Journal of Safety Research, 2005.
- [76] Smith P., Shah M., Da Vitoria Lobo N., *"Monitoring head/eye motion for driver alertness with one camera,"* 15th International Conference on Pattern Recognition, vol. 4, pp. 636--642, Barcelona, 2000.
- [77] Strambersky L., Cejnek M., Martoch J., *"Fast Track – Static and Dynamic Bending Analysis"*, SAE Technical Paper N° 2004-01-0440, SAE World Congress, Detroit, Michigan, March 8-11, 2004.
- [78] Takemura K., Ido J., Matsumoto Y., Ogasawra T., *"Drive Monitoring System Based On Non-Contact Measurement System of Driver's Focus of Visual Attention"*, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2003), Columbus, Ohio, USA, June 2003.
- [79] Tsimhoni O., Green P., *"Visual Demand of Driving Curves Determined by Visual Occlusion"*, Vision in Vehicles 8 Conference, Boston, MA, 1999.
- [80] Underwood G., Champan P., Brocklehurst N., Underwood J., Grundall D., *"Visual Attention While Driving : Sequences of Eye Fixations Made by Experienced and Novice Drivers"*, Ergonomics; 46(6), pp. 629-46, May 15, 2003.
- [81] Vogt W., Varchmin A., Garrelts M., Mittaz M., *"Navigation-based driver assistance systems"*, ITS European Congress, Hannover, Germany, June 2005.
- [82] Wilkie R. M., Wann J. P., *"Eye-movements aid the control of locomotion"*, Journal of Vision, 3(11), 677-684, 2003.
- [83] Yamamoto I., *"AFS Light Distribution Control"*, SAE Technical Paper N° 2004-01-0438, SAE World Congress, Detroit, Michigan, March 8-11, 2004.
- [84] Young M., Chang C., Chuang Y., *"A study of drivers viewing field when driving on curvy roads"*, 3rd International Conference on Traffic & Transport Psychology, Albert Hall, Nottingham, UK, 5 – 9 September 2004.

Deuxième partie : chapitres 3 et 4

- [85] Abuhadrous I., *"Système Embarqué Temps Réel de Localisation et de Modélisation 3D par Fusion Multi-Capteur"*, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2005.
- [86] Appriou A., *"Multiple Signal Tracking Processes"*, Aerospace Science and Technology, No. 3, pp. 165-178, 1997.
- [87] Barton, M. J., *"Controller development and implementation for path planning and following in an autonomous urban vehicle"*, Rapport pour l'obtention du diplôme de "Bachelor of Engineering", Australian Centre for Field Robotics (ACFR), Université de Sydney, 2001.
- [88] Bellot D., *"Fusion de Données avec des Réseaux Bayésiens pour la Modélisation des Systèmes Dynamiques et son Application en Télé-médecine"*, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy 1, 2002.
- [89] Bloch I., *"Fusion d'Informations en Traitement du Signal et des Images"*, Traité IC2, série Traitement du signal et de l'image, Hermès Science Publications, Paris, ISBN 2-7462-0628-5, 2003.
- [90] Bonnifait P., *"Contribution à la localisation dynamique d'automobiles. Application à l'aide à la conduite"*, HDR (Habilitation à Diriger des Recherches), Université de Technologie de Compiègne, 2005.
- [91] Bouchon-Meunier B., Marsala C., *"Logique Floue, Principes, Aide à la Décision"*, Hermès Science Publications, Paris, ISBN 2746205432, 2003.

- [92] Caroux J., "*Optimisation des lois de commande d'éclairage automobile par fusion de données*", Rapport de DEA, Université de Haute – Alsace, 2003.
- [93] Cherfaoui, V., Burie, J-C., Royère C., Gruyer D., "*Dealing with uncertainty in perception system for the characterization of driving situation*", IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp. 77-82, Dearborn (MI), USA, October 1-3, 2000.
- [94] Cramer H., Scheunert U., Wanielik G., "*A New Approach for Tracking Lanes by Fusing Image Measurements with Map Data*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 607-612, University of Parma, Parma, Italy, June 14-17, 2004.
- [95] Darms M., Winner H., "*A Modular System Architecture for Sensor Data Processing of ADAS Applications*", IEEE Intelligent Transportation Systems, Hannover, Germany, pp. 729-734, 2005.
- [96] Dempster A. P., "*Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping*", Anals of Mathematical Statistics, 38:325-339, 1967.
- [97] Denoeux T., "*A Neural Network Classifier Based on Dempster-Shafer Theory*", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A : Systems and Humans, Vol. 30, No. 2, March 2000.
- [98] Desodt-Lebrun A-M., "*Fusion de Données*", Techniques de l'ingénieur. Traité Mesures et Contrôle, Réf. R7226, 1996.
- [99] Dubois D., Prade H., "*Possibility theory in information fusion*", IEEE Information Fusion Conference, pp. 6-19, vol.1, 2000.
- [100] Dubrovin A., Lelevé J., Prevost A., Canry M., Cherfan S., Lecoq P., Kelada J. M., Kemeny A., "*Application of real-time lighting simulation for intelligent front-lighting studies*", Proceedings of the Driving Simulation Conference, pp.333-343, Paris, September 2000.
- [101] Egerstedt M., Hu X., Stotsky A., "*Control of mobile platforms using a virtual vehicle*", IEEE Transactions on automatic control, vol. 46, N_11, pp. 1777-1782, 2001.
- [102] Ehrlich J., Marchi M., Saad F., Sauvagnac P., Salesse L., Jarri P., Guichon D., Lassarre S., Page Y., "*Limitation Adaptative de Vitesse : Le Projet LAVIA*", Congrès International ATEC, Paris, 2003.
- [103] El Badaoui El Najjar M., "*Localisation dynamique d'un véhicule sur une carte routière numérique pour l'assistance à la conduite*", Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2003.
- [104] Gissinger G., Le Fort-Piat N., "*La Voiture Intelligente*", Hermès Science Publications, Paris, ISBN 2-7462-0512-2, 2002.
- [105] Gning El Hadji A., "*Localisation Garantie d'Automobiles. Contributions aux Techniques de Satisfaction de Contraintes sur les Intervalles*", Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2006.
- [106] Goodwin G. C., "*Evaluating the Performance of Virtual Sensors*", IEEE conference, pp. 5-12, 1999.
- [107] Grandin J-F., "*Fusion de données : Théorie et méthodes*", Techniques de l'Ingénieur, Réf. S7224, Mars 2006.
- [108] Gruyer D., Mangeas M., Alix R., "*Multi-sensors Fusion Approach for Driver Assistance Systems*", IEEE ROMAN2001, Bordeaux, 18-21 September 2001.
- [109] Gruyer D., Mangeas M., Royère C., "*A New Approach for Credibilistic Multi-Sensor Association*", IEEE FUSION2002, Annapolis, Maryland USA, July 7-11, 2002.
- [110] Gustafsson F., "*Sensor Fusion for Accurate Computation of Yaw Rate and Absolute Velocity*", SAE Technical Paper N° 2001-01-1064, 2001.
- [111] Gustafsson F., "*Virtual Sensors of Tire Pressure and Road Friction*", SAE Technical Paper N° 2001-01-0769, 2001.
- [112] Hac A., Simpson M. D., "*Estimation of Vehicle Side Slip Angle and Yaw Rate*", SAE Technical Paper N° 2000-01-0696, 2000.
- [113] Hall D. L., "*Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*", Artech House, ISBN 0-89006-558-6, 1992.
- [114] Hamm M., Rosenhahn E-O., "*System Strategies and Technology for Improved Safety and Comfort with Adaptive Headlamps*", SAE Technical Paper N° 2001-01-0299, SAE World Congress, Detroit, Michigan, March 5-8, 2001.

- [115] Janssen H., Niehsen W., "Vehicle surround sensing based on information fusion of monocular video and digital map", IEEE Intelligent Vehicle Symposium IVS04, pp. 244-249, 2004.
- [116] Jouannin S., "Association et Fusion de Données : Application au Suivi et à la Localisation d'Obstacles par Radar à Bord d'un Véhicule Routier Intelligent", Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 1999.
- [117] Kais M., Millescamps D., Bétaille D., Lusetti B., Chapelon A., "A Multi-Sensor Acquisition Architecture and Real-Time Reference for Sensor and Fusion Methods Benchmarking", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Tokyo, Japan, pp. 418-423, 2006.
- [118] Klein L. A., "Sensor and Data Fusion: A Tool for Information Assessment and Decision Making", SPIE PRESS, Bellingham, Washington, USA, ISBN 0-8194-5435-4, 2004.
- [119] Konnen J., Gilliéron P. Y., "Systèmes de navigation de haute précision pour l'automobile", Mensuration, Photogrammétrie, Génie rural, vol. a (2002), p. 508-511, 2002.
- [120] Lauffenburger J. P., "Contribution à la surveillance temps-réel du système «conducteur – véhicule – environnement»: élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite", Thèse de Doctorat, Université de Haute – Alsace, N° d'ordre 02MULH0706, 2002.
- [121] Lauffenburger J. P., Petitjean C., Basset M., Perronne J. M., "NAICC: an Embedded Architecture for Driver Assistance Systems Design", IEEE IV2003, Intelligent Vehicles Symposium, OHIO, USA, 9 – 11 June, 2003.
- [122] Laurin E., "Système Intelligent d'Assistance à la Perception dans la Conduite de Véhicule", Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 2000.
- [123] Lefèvre E., "Fusion Adaptée d'Informations Conflictuelles dans le Cadre de la Théorie de l'Evidence – Application au Diagnostic Médical", Thèse de Doctorat, INSA (Institut National des Sciences Appliquées) de Rouen, 2001.
- [124] Lefevre E., Colot O., Vannoorenberghe P., De Bruçq D., "A Generic Framework for Resolving the Conflict in the Combination of Belief Structures", 3rd International Conference on Information Fusion, FUSION'2000, pp. 11-18, 2000.
- [125] Lefevre E., Colot O., Vannoorenberghe P., De Bruçq D., "Contribution des Mesures d'Information à la Modélisation Crédibiliste de Connaissances", Revue du Traitement du Signal vol. 17, n. 2, pp. 87-97, 2000.
- [126] Lefevre E., Colot O., Vannoorenberghe P., De Bruçq D., "Knowledge Modeling Methods in the Framework of Evidence Theory – An Experimental Comparison for Melanoma Detection", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, SMC'2000, pp. 2806-2811, 2000.
- [127] Long T. W., Hanzevack E. L., Bynum W. L., "Sensor Fusion and Failure Detection Using Virtual Sensors", American Control Conference, pp. 2417-2421, San Diego, California, June, 1999.
- [128] Martin A., "La Fusion d'Informations", Polycopié de cours ENSIETA - Réf. : 1484, Janvier 2005.
- [129] Masson M-H., "Apports de la théorie des possibilités et des fonctions de croyance à l'analyse de données imprécises", HDR (Habilitation à Diriger des Recherches), Université de Technologie de Compiègne, 2005.
- [130] Mourllion B., "Perception et Localisation Collaboratives à partir de Données Imprécises et incertaines", Mémoire de DEA, Université de Technologie de Compiègne, 2003.
- [131] Mourllion B., Gruyer D., Royère C., Théroutte S., "Multi-Hypotheses Tracking Algorithm Based on the Belief Theory", IEEE International Conference on Information Fusion, Philadelphia, PA, USA, July 2005.
- [132] Navigation Technologies, "Navigation Technologies ADASRP: Advanced Driver Assistance Systems Research Platform, Version 3.8", User Manual, July 2003.
- [133] Nelson, W., "Continuous steering-function control of robot cars", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 36, N° 3, pp. 330-337, 1989.
- [134] Nigro, J. M., Loriette-Rougegréz S., Rombaut, M.; Jarkass, I., "Driving situation recognition in the CASSICE project towards an uncertainty management", IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings ITSC, pp. 71-76, 2000.

- [135] Nimier V., *"Introduction d'Informations Contextuelles dans des Algorithmes de Fusion Multicapteur"*, Revue du Traitement du Signal, vol. 14, n. 5, pp. 110-119, 1997.
- [136] Ould Yahia S., Loriette-Rougegrez S., "Fuzzy Querying of Evolutive Situations: Application to Driving Situations", Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.9, No.1 pp. 13-17, 2005.
- [137] Pinto Ribeiro R., *"Système de Commande Prédictive pour Projecteurs Directionnels"*, Mémoire d'ingénieur, Ecole Supérieure de Conception et de Production Industrielles, 2003.
- [138] Polychronopoulos A., Tsogas M., Amditis A., Etemad A., "Extended Path Prediction Using Camera and Map Data for Lane Keeping Support", IEEE Intelligent Transportation Systems ITS, pp. 166-171, 2005.
- [139] Prokhorov D., *"Virtual Sensors and Their Automotive Applications"*, IEEE Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference, pp. 411-416, Decembre 5-8, 2005.
- [140] Reeds J. A., Shepp L. A., "Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards", Pacific Journal of Mathematics, 1990, Vol. 145, N° 2, pp. 367-393, 1990.
- [141] Ress C., Etemad A., Hochkirchen T., Kuck D., "Electronic Horizon – Supporting ADAS Applications with Predictive Map Data", ITS European Congress, Hannover, Germany, June 2005.
- [142] Revue A., *"Contribution des Systèmes d'Informations Géographiques à la Sécurité Routière : Approche Multicapteurs pour l'Evaluation de Configurations à Risques"*, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [143] Rombaut M., *"Fusion : Etat de l'Art et Perspectives"*, Technical Report DSP 99.60.078, Rapport DGA, 22 octobre 2001.
- [144] Rombaut M., Saad, F., *"CASSICE : Symbolic Characterization of Driving Situation"*, IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp. 77-82, Dearborn (MI), USA, October 1-3, 2000.
- [145] Salahuddin Khan M, Roser Herbst M., "The Significance of Navigation Map Databases in Advanced Driver Systems and Dynamic Route Guidance", SAE Technical Paper N° 2000-01-C076, 2000.
- [146] Scheuer A., Fraichard T., "Collision-free and continuous-curvature path planning for car-like robots", IEEE Conference on Robotics and Automation, 1997.
- [147] Shafer G., *"A Mathematical Theory of Evidence"*, Princeton University Press, 1976.
- [148] Siegel M., Wu H., "Confidence Fusion", IEEE Workshop on Robotic Sensing, Graz, Austria, pp. 94-99, 2004.
- [149] Smets Ph., *"Data Fusion in the Transferable Belief Model"*, International Conference on Information Fusion, vol. 1, pp. 21-33, Paris, France, 2000.
- [150] Smets Ph., *"Practical Uses of Belief Functions"*, Uncertainty in Artificial Intelligence 15. UAI99, pp. 612-621, 1999.
- [151] Steinberg A., Bowman C., White F., *"Revisions to the JDL Data Fusion Model"*, Proceedings of SPIE Conference. Sensor Fusion: Architectures, Algorithms and Applications III, volume 3719, pages 430-441, April 1999.
- [152] Stéphant J., Charara A., Meizel D., *"Virtual Sensor : Application to Vehicle Slideslip Angle and Transversal Forces"*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, No. 51, pp. 278-289, 2004.
- [153] Touil K., Zribi M., Benjelloun M., *"Méthode de Localisation d'un Véhicule sur une Carte Routière Basée sur le Modèle de Croyances TRANSférables"*, MajecStic (MANifestation des Jeunes Chercheurs STIC), Lorient, 22-24 novembre, 2006.
- [154] Vannoorenberghe P., Lefevre E., Colot O., *"Application de la Théorie des Fonctions de Croyances à la Surveillance de l'Environnement"*, Rencontres Francophone sur la Logique Floue et ses Applications, LFA'2000, pp. 229-236, 2000.
- [155] Vogt W., Varchmin A., Garrelts M., Mittaz M., "Navigation-based driver assistance systems", ITS European Congress, Hannover, Germany, June 2005.
- [156] Yager R. R., *"On the Dempster Shafer Framework and New Combination Rules"*, Information Sciences, Vol. 41, pp. 93-137, 1987.

Troisième partie : chapitre 5

- [157] dSPACE, "*ControlDesk – Experiment Guide*", Release 4.1, March 2004.
- [158] Findeis M., Pabst I., "*Functional Safety in the Automotive Industry, Process and Methods*", VDA Winter meeting, 2006.
- [159] http://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_en_V
- [160] <http://www.dspace.fr>
- [161] <http://www.intempora.fr>
- [162] <http://www.mathworks.com>
- [163] Ibarra-Alvarado E., "*Software Hazard Analysis for X-By-Wire Applications*", MoDELS 2005 Doctoral Symposium, Jamaica, October 2005.
- [164] Intempora, "*RTMAPS[®] SDK, Version 2*", User Documentation, 2002.
- [165] Intempora, "*RTMAPS[®] STUDIO, Version 2*", User Documentation, 2002.
- [166] Ishiguro K., Yamada Y., "*Control Technology for Bending Mode AFS*", SAE Technical Paper N° 2004-01-0441, SAE World Congress, Detroit, Michigan, March 8-11, 2004.
- [167] Kocik R., Sorel Y., "*De la Modélisation à la Réalisation : Réduction du Cycle de Développement des Applications Temps Réel Distribué*", 8th RTS2000 Real-Time Systems Conference, Paris, France, March 2000.
- [168] Navigation Technologies, "*Navigation Technologies ADASRP: Advanced Driver Assistance Systems Research Platform, Version 3.8*", User's Manual, July 2003.
- [169] Navteq, "*ADASRP 2006, Version 2.11*", User's Manual, June 2006.

6. Annexes

6.1. Analyse fonctionnelle du système NAFS

L'analyse fonctionnelle du système d'éclairage basé sur la navigation a été effectuée en considérant le SIG comme un capteur additionnel utilisé pour la gestion de la fonction d'éclairage. L'analyse permettra d'initier par la suite l'analyse préliminaire des risques. L'analyse fonctionnelle de NAFS a été menée en s'appuyant sur celle du système d'éclairage traditionnel, complétée des fonctions liées au SIG. L'objectif de cette étape consiste à définir les fonctions principales ainsi que les fonctions de contraintes du système global. Les fonctions principales sont des relations entre deux composantes du milieu extérieur établies par l'intermédiaire du système étudié. Elles justifient la création du système. Les fonctions de contraintes ont pour but de définir les contraintes imposées au système par son milieu extérieur d'utilisation. Elles identifient les relations entre l'objet et un élément du milieu extérieur. Dans cette étude, deux phases de vie du système ont été considérées : la phase d'assemblage et de maintenance et la phase de conduite correspondant à son utilisation. Seule cette dernière est présentée dans ce mémoire du fait de son importance par rapport aux développements effectués.

6.1.1. Définitions des fonctions principales

La Figure 6-1 montre le diagramme d'environnement des fonctions principales du système NAFS. Ces fonctions principales ont été définies en collaboration avec l'expert de Valeo. Pour des besoins d'utilisation interne à l'entreprise, elles ont été rédigées en anglais.

- MF 01 :** To allow the driver to improve his night vision in optimising the front beam pattern thanks to vehicle and navigation (ADASRP) information.
- MF 01 A :** To control the classical lighting functions (B.P.B : Basic Passing Beam, Fog, High beam), included BPB automatic activation in tunnels.
 - MF 01 B :** To adapt automatically the beam to corners and changes of direction, anticipating (respecting regulation and with secured information) on driver action to improve the driver's sight (Bending Light).
 - MF 01 C :** To adapt automatically the beam to the speed of vehicle and road type in order to improve the driver's sight (Motorway Light).
 - MF 01 D :** To adapt automatically the lighting system to town driving and crossroads in order to improve the driver's sight as well as seeing the possible obstacles and pedestrians more easily.(Town Light)
 - MF 01 E :** To adapt automatically the luminous beam to drive by adverse weather in order to improve the driver's sight and to avoid dazzling the other road users. (Adverse Weather Light)
 - MF 01 F :** To adapt lighting system of the vehicle in order to help driver to see overhead road signs (Overhead Light)
 - MF 01 G :** Lighting Functions Management
 - MF 01 H :** To switch automatically from LHT (Left Hand Traffic) to RHT (Right Hand Traffic) and reverse.
- MF 02 :** To signal the position or direction changes of vehicle to the other road users.
- MF 03 :** To adapt the beam to static and dynamic loads of vehicle in order to avoid dazzling the other road users and to ensure an optimal visibility to the driver.
- MF 04 :** To communicate with other systems vehicle to manage it

- MF 05** To prevent the driver of the lighting system state (operating and circuit closed Tell tales as well as limped home modes management)
- MF 06** To manage power supply following information coming from vehicle intelligence (body controller or Front end module controller,...)

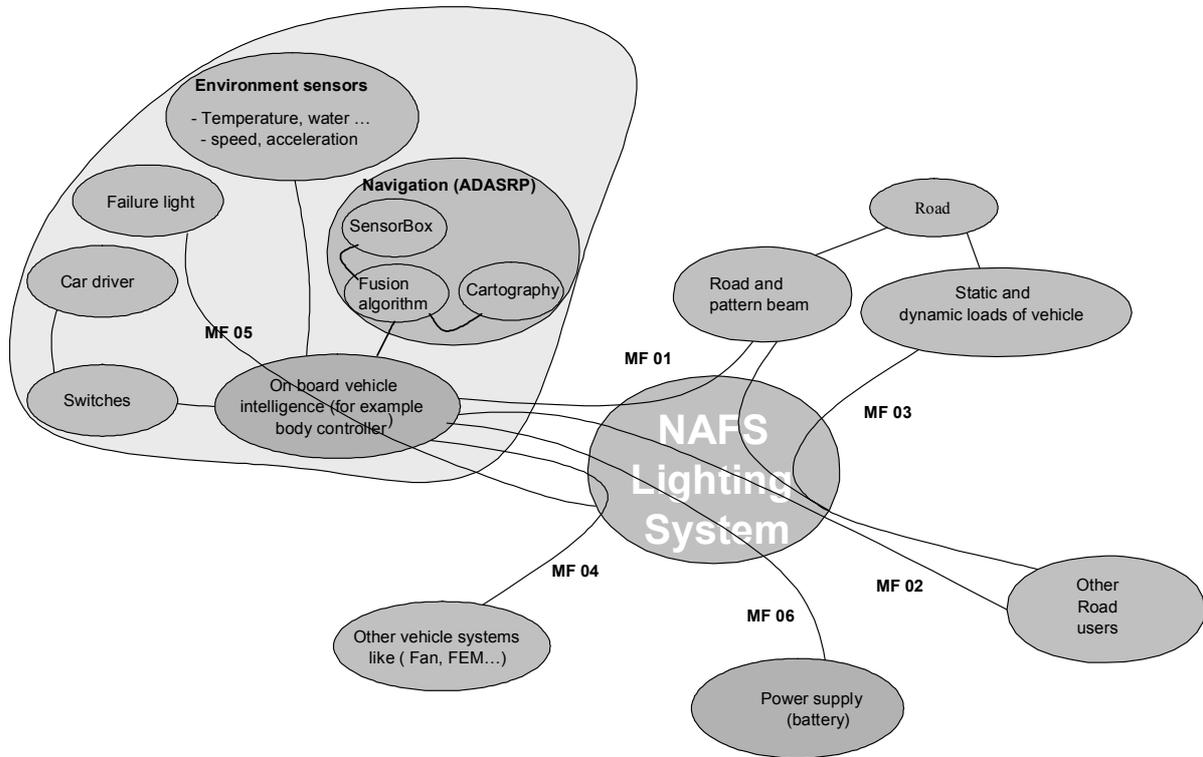


Figure 6-1 : Diagramme d'environnement des fonctions principales du système NAFS

<u>SUMMARY OF MAIN FUNCTIONS.</u>	
MF 01 : TO SEE A1 : Basic passing beam A2 : High beam function A3 : Fog function B : Bending light Main Bending Light Additional Bending Light Fixed Bending light C : Motorway Lighting D : Town lighting E : Adverse Weather Lighting F : Overhead lighting G : Management.of Lighting Functions H : Traffic Change	MF 02 : TO BE SEEN. A Direction indicator B Warning C City Light D Day-time Running Light E Flashes
MF 03 : ATTITUDE CORRECTION.	MF 04 : TO COMMUNICATE
MF 05 : FAILURES MANAGEMENT	MF 06 : POWER MANAGEMENT

Tableau 6-1 : Résumé des fonctions principales

6.1.2. Définitions des fonctions de contraintes

- CF 01 :** To respect the regulations.
- CF 02 :** To respect the constraint of VALEO's standards.
- CF 03 :** To respect environment standards.
- CF 04 :** To respect the constraints of carmakers.

- CF 05 :** To take into account static and dynamic constraints of vehicle.
- CF 06 :** To take into account the features of roads.
- CF 07 :** To take into account the driver's safety.
a / The lighting system must be comfortable for drivers (the switch between and within AFS functions shall be smooth and without flickering and disturbing).
b / The driver must be able to deactivate AFS functions.
c / To inform the driver of system failures.
- CF 08 :** To take into account the inside environment of vehicle.
- EMC in emission and in reception.
 - Temperature.
 - Pollution physicochemical (essence, acid, brake liquid ...)
 - Connections of wires
 - Mechanical stress due to engine : vibrations....
- CF 09 :** To take into account the outside environment of the vehicle
- Temperature.
 - Humidity.
 - Electromagnetic constraint.
 - Dirty mark (mud,...)
 - Salt
 - Mechanical stresses.
 - gravels
- CF 10 :** To use the available power supplies (batteries) with their constraints linked to the automotive use.
- CF 11 :** To participate in the style of the vehicle.
- CF 12 :** To detect system failures and to associate them to limped home modes.
- CF 13 :** To not dazzle the other road users.
- CF 14 :** Lighting system must be compatible with the duration life of the vehicle (life cycle, reliability,...).
- CF 15 :** To decode information coming from the vehicle and translating the state and environment of vehicle. (Data buses, harnesses...)
- CF 16 :** To allow the connection between lighting system and vehicle architecture.
- CF 17 :** To provide navigation information with an acceptable confidence level.
- Satellites visibility.
 - Precision of the cartography in ADASRP.
 - Information available on Data Base.
 - Sample of ADASRP.
 - Precision of the fusion and map matching algorithms of ADASRP.
 - Choice of the pertinent point of vision in the bends.
 - Choice of the pertinent point of vision with respect to the vehicle speed.
 - To detect failures of the Sensor Box and to associate them to limped home modes.
 - Connections of wires.
 - The precision of the GPS of the Sensor Box.
 - The precision of the speed sensor of the vehicle.
 - The precision of the piezoelectric Gyroscope.
 - Mechanical stress of the Sensor Box due to the vehicle displacement : vibrations, ...
 - To detect low level of reliability of ADASRP information and to associate them to algorithm choice and limped home modes.

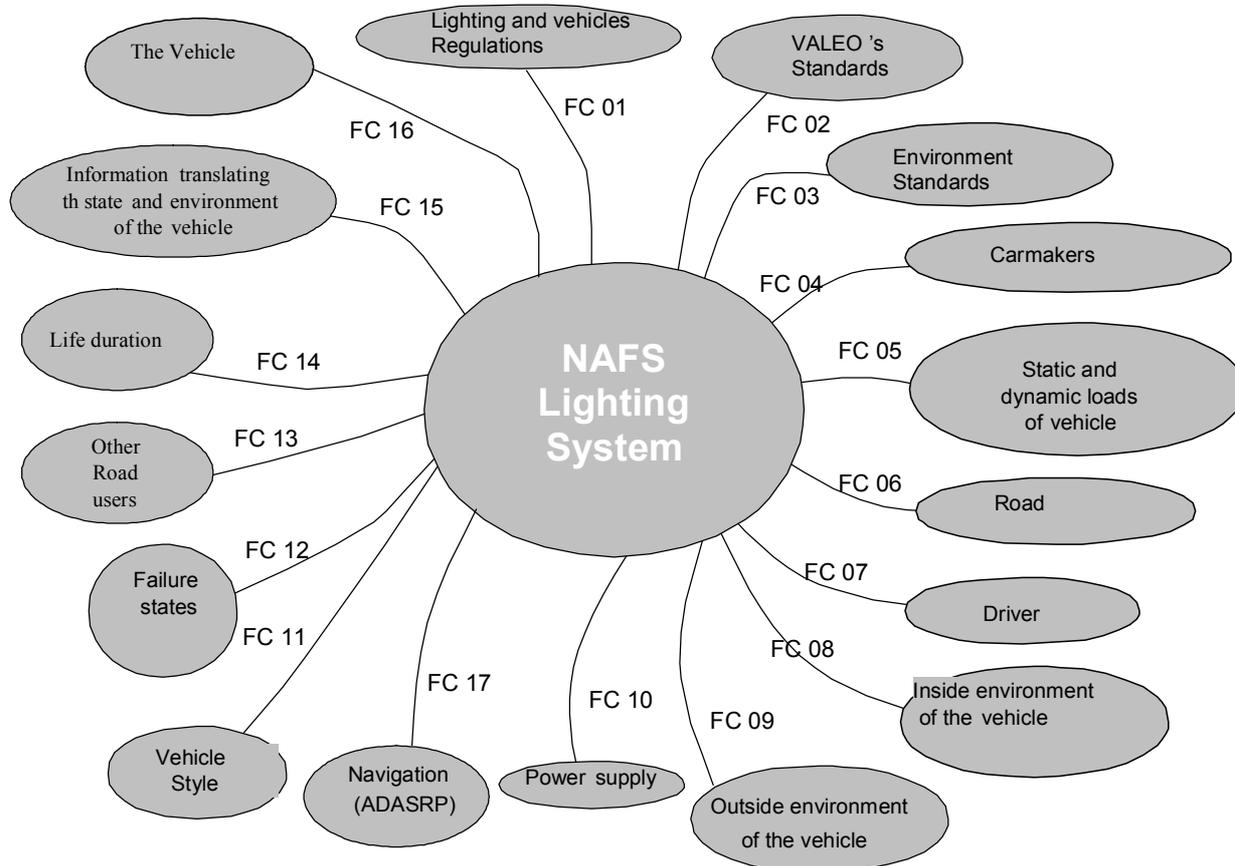


Figure 6-2: Diagramme d'environnement des fonctions de contrainte du système NAFS

6.2. Analyse préliminaire des risques

L'objectif de l'analyse préliminaire des risques est d'analyser le système NAFS afin de définir les événements indésirables ou redoutés qui pourraient être générés par la défaillance du système. Cette analyse permettra donc d'initier les arbres de défaillance. En effet, pour chaque fonction principale et donc la fonction d'éclairage lui correspondant, une table des événements redoutés possibles est complétée. Les modes de défaillance et leurs criticités sont étudiés à ce stade. Pour chaque fonction principale, on réalise un tableau d'analyse préliminaire des risques. Un exemple pour la fonction principale MF01 est présenté sur le Tableau 6-2. Pour chaque mode de défaillance (*Failure Mode*) pouvant avoir lieu (*No function*, *Loss of function*, *Untimely function*, *Degraded function*) on définit ses effets sur le système (*System effects*). Les événements redoutés (*Unwanted events*) associés sont également définis. Ensuite, des degrés de sévérité en termes de sécurité et de disponibilité sont assignés à chaque événement redouté. Ces degrés sont basés sur des grilles de cotation de sécurité (cf. Tableau 6-3) et de disponibilité (cf. Tableau 6-4)

Failure mode	Local consequences : System effect	Unwanted events : Customer's effect	Severity Availability
No function	- No lighting of both headlamp when driver wants to activate them	- Vehicle stop / Vehicle Speeds down following luminosity	S2 / D3
	- No automatic activation in channels	- Vehicle speeds down following luminosity	S2 / D3
Loss of function	- Total loss of lighting during low beam operation	- Accident Risk	S4 / D4
Untimely function	- Untimely switching on	- Customer's Dissatisfaction	S1/D1
	- Untimely transition in TL lighting in intertown driving	- Customer's Dissatisfaction	S2/D1
	- Untimely transition in ML lighting	- Dazzling	S3/D1
	- Untimely transition (tourism mode)	- Dazzling	S3/D3
Degraded function	- beam Intensity variation (R/L headlamps)	- Customer's Dissatisfaction	S1 / D1
	- No operating of 1 headlamp on both.	- Customer's Dissatisfaction - Frontal collision due to motorbike effect	S2 / D2 S4 / D4
	- Under-lighting of 2 headlamps.(due to system or dust)	- Reduced beam range	S2 / D3
	- Over-lighting of 1 headlamp on both	- Dazzling	S3 / D1
	- Luminous beam instability. (jerks)	- Customer's Dissatisfaction	S2 / D1

Tableau 6-2 : Analyse préliminaire des risques

Après avoir fait une table pour chaque fonction principale, une table de synthèse permet de définir les événements redoutés avec les degrés de sévérité les plus grands en terme de sécurité et de disponibilité. Pour ces événements redoutés, des arbres de défaillances sont réalisés pour pouvoir définir les éléments de base contribuant à ces événements redoutés et de réaliser les modes dégradés leurs correspondants.

Risk Quotation	Event and Effect Type	Description
S0	Event without effect	No significant effect on the human and the environment
S1	Event with minor effect	Negligible damage for the human and/or the environment without risks of wounds or environmental pollution (for example: fear, visual or auditive or physical embarrassment). Effort or more significant vigilance.
S2	Event with significant effect	Without damage or significant risk for the human (light wound; for example: surface wounds of scratches type, burns surface) and/or the environment (for example: local waste of oil seepage or escape drop by drop).
S3	Event with critical effect	Significant damage for the human being (serious wound; for example: member fracture, incision or deep cut causing a significant bleeding) and/or the environment without death risk (for example: spreading of a toxic product or pollutant of the oil loss contained in limps speed)
S4	Event with catastrophic effect	Very significant damage for the human being (for example: coma, cranial traumatism, dead) and/or the environment until the died risk and/or deterioration of the environment (release significant of fume or toxic products, destruction of the flora/fauna)

Tableau 6-3 : Grille de cotation de sécurité

Availability Quotation	Description
D0	No effect
D1	Reversible degradation of system operation without obligation of immediate repair (for example: delayed windscreen wipers (a few minutes after starting) per time of freezing)
D2	Reversible loss of system operation i.e. with operation resumption after restoring of contact or system (for example: seat adjustment blocked in low position or intermittent posting of outside temperature)
D3	Irreversible loss of essential system functions and/or notable damage of the close systems but driving possible or possibly being able to generate a vehicle stopping with a possible restarting after handing-over of the contact (for example: impossibility of ordering of close/open of electric windows or loss of the centralised judgement of the doors)
D4	Irreversible loss of a main system function and/or system damage and/or close system damages involving an impossible driving and/or an vehicle immobilisation requiring a compulsory intervention (for example: engine break-in, inopportune release of gasoline arrival cut (FIS) or not/loss of lighting making impossible the night driving)

Tableau 6-4 : Grille de cotation de disponibilité

6.2.1. Découpage fonctionnel et arbres de défaillances des évènements redoutés

Dans cette étape, le découpage fonctionnel du système selon les aspects matériel et logiciel permet de définir les éléments de base qui interviennent ou qui peuvent contribuer à l'évènement redouté considéré. Après cette étape, pour chaque évènement redouté (parmi ceux qui sont à haut risque S et D ≥ 3). Pour ces évènements de base, on définit des modes dégradés qui permettent de passer à un mode nominal par exemple. Sur la Figure 6-3 est montré une branche d'un arbre de défaillances réalisé pour l'étude du système NAFS et concernant l'évènement redouté *Dazzling* (éblouissement). Sur cette branche, sont présentés les modes dégradés pour les évènements de base contribuant à cet évènement redouté. Si le contexte de conduite sur autoroute est détecté en zone urbaine (cf. E004 sur la figure), avant de passer au mode dégradé (*Limped home* E008 sur la figure), une vérification de la vitesse du véhicule est faite durant une période prédéfinie afin de s'assurer qu'il ne s'agit par exemple pas d'une transition intempestive due à une défaillance de la cartographie (mauvaise représentation). Si ce n'est pas le cas, un passage en mode code (*low beam*) est effectué afin de ne pas éblouir les autres usagers de la route.

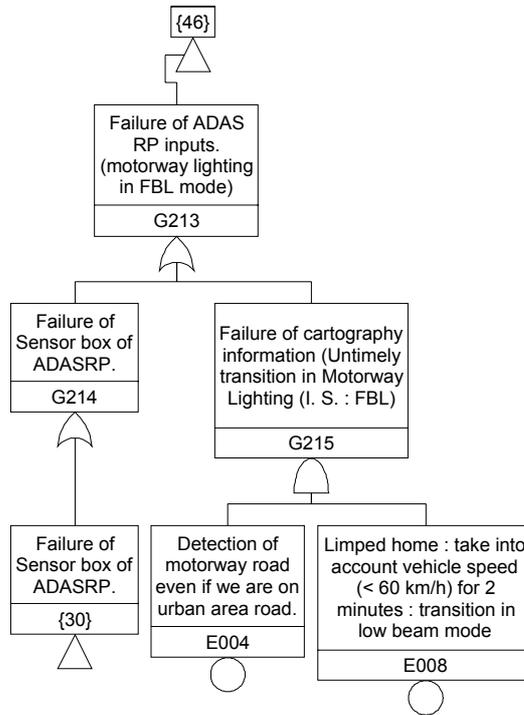


Figure 6-3 : Branche de l'arbre de défaillance de l'évènement redouté éblouissement